

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL DE QUEMA Y/O VENTEO BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN EL ORIENTE VENEZOLANO**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Zorrilla C., Adriana D.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2014

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL DE QUEMA Y/O VENTEO BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN EL ORIENTE VENEZOLANO**

TUTORES ACADÉMICOS: Prof. Francisco Yáñez  
Prof. Johliny Casanova

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Zorrilla C., Adriana D.  
Para optar al Título  
de Ingeniero Químico

Caracas, 2014

Caracas, febrero, 2014

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiler Adriana Del Valle Zorrilla Caraballo, titulado:

**“VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL DE QUEMA Y/O  
VENTEO BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN  
EN EL ORIENTE VENEZOLANO”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Químico, y sin que esto signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran **APROBADO**

---

Profa. Lucy Monsalve  
Jurado

---

Profa. Leonardo Oropeza  
Jurado

---

Prof. Francisco Yáñez  
Tutor Académico

---

Profa. Johliny Casanova  
Tutor Académico

## DEDICATORIA

*A Dios y a la Virgen del Valle por permitirme lograr este sueño tan anhelado.*

*A mis padres, en especial a mi madre Celia Caraballo por ser mi guía y mi apoyo en todo este camino recorrido, sin ti mamá no sería quien soy ahora, eres un ser maravilloso que ha luchado incansablemente por el bienestar de mi hermana y el mío y te doy las gracias por darme la vida y por estar conmigo siempre en todo momento, a ti te lo debo todo y es un gran orgullo ser tu hija, aunque no te lo diga a cada rato TE AMO y te quiero muchísimo. ¡GRACIAS!*

*A mi tía y madrina Carmen Caraballo mi segunda madre, gracias tía por estar siempre presente, por quererme y apoyarme, al igual que mi mamá eres una persona excepcional para mi vida tú me cuidaste y también me criaste y estoy eternamente agradecida contigo por todo lo que me has dado. ¡Te quiero mucho!*

*A mi hermana Mariam Zorrilla, mi consentida, gracias por existir, eres parte fundamental en mi vida y te adoro.*

*A mi novio Luis Antonio por estar a mi lado durante 8 años, gracias por ser mi compañero y mi amigo sobre todas las cosas, por apoyarme siempre, por darme una palabra de aliento en momentos difíciles, por tolerar mi carácter fuerte y por quererme tanto. Eres lo más hermoso que me ha pasado en la vida y TE AMO inmensamente gordito.*

*Finalmente le dedico este triunfo a mis abuelos, especialmente a tí Abuelita Enriqueta fuiste mi tercera madre, me diste mi primer baño, aún recuerdo que todos los días soñaba con que al llegar del colegio te iba a ver en la casa preparándome mi leche con galleta. Eres un ejemplo de lucha incansable, te aferraste siempre a la vida, fuiste una madre amorosa y la mejor abuela del mundo. Dios no me dio la dicha de que me vieras convertida en Ingeniera pero sé que desde el cielo estás feliz por mí. Te extraño muchísimo abuelita ¡no sabes cuánto! donde quiera que estés te envío un abrazo y un beso inmenso. ¡TE AMO!*

## AGRADECIMIENTOS

*Deseo expresar mis más sinceras muestras de agradecimiento  
A la ilustre Universidad Central de Venezuela (UCV) en especial  
a la Escuela de Ingeniería Química por darme la oportunidad de  
ser parte de una generación de triunfadores y gente productiva  
para el país.*

*A mi tutor Prof. Francisco Yáñez por sus horas de dedicación,  
apoyo y por ser más que un profesor un amigo.*

*A mi tutora Profa. Johliny Casanova por su apoyo incondicional  
y por sacar minutos de su valioso tiempo para atender mis  
dudas.*

*¡Mil Gracias!*

Zorrilla C., Adriana D.

## VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL DE QUEMA Y/O VENTEO BAJO DISTINTOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN EN EL ORIENTE VENEZOLANO

**Tutores Académicos:** Prof. Francisco Yáñez y Profa. Johliny Casanova. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2014, 104 pp.

**Palabras claves:** Gas Natural, Quema, Venteo, Valorización, Oriente Venezolano

**Resumen.** El gas natural ha pasado a ocupar un importante espacio en el escenario energético mundial, con un crecimiento continuo de la demanda. Venezuela está considerada como una de las naciones más importantes como potencial suplidor de energía gasífera por sus cuantiosas reservas de gas, su ventajosa posición geográfica e importancia geopolítica. Una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial es la quema y/o venteo de gases, estos gases poseen un alto valor energético que puede ser aprovechado, una vez limpios de contaminantes y luego pueden ser fraccionados en subproductos de alto valor agregado como lo son el metano, etano, propano, butanos y  $C_5^+$ , por lo cual es posible generar distintos escenarios de producción y explotación de estos gases, que generen alta rentabilidad y factibilidad técnica y económica para su aprovechamiento, para ello, en el presente Trabajo Especial de Grado se evaluaron escenarios de producción para el aprovechamiento de estos gases de quema y/o venteo en el oriente venezolano. Los escenarios de producción considerados fueron: **escenario 1**; precios del gas y energía regulada en Venezuela, **escenario 2**; precios del gas a nivel internacional y energía regulada en Venezuela. Para evaluarlos se esquematizó el sistema de valorización del gas natural, se estimaron los costos asociados al tratamiento, separación y transporte de los compuestos que conforman el gas de quema y/o venteo y luego se construyeron curvas de capacidades en función de las rentabilidades, calculando el punto de equilibrio, el cual permitió determinar cuál de estos escenarios es el más beneficioso para el uso del gas natural. Al evaluar el escenario 1 mediante el cálculo del punto de equilibrio, se determinó que al manejar los precios regulados en Venezuela, procesar una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) en cualquiera que sea el caso no resulta rentable; ya que, esta capacidad siempre se encuentra por debajo del punto de equilibrio, generando pérdidas constantes. Al realizar el mismo análisis para el escenario 2 se determinó que al manejar los precios a nivel internacional el proceso resulta económicamente rentable; ya que, la capacidad de interés se encuentra siempre por encima del punto de equilibrio, obteniendo utilidades, siendo este escenario en el cual se obtienen los mejores beneficios para el uso del gas natural.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|               |                                                                                                                          |    |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO I.   | FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN .....                                                                                    | 16 |
| I.1           | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....                                                                                          | 16 |
| I.2           | ANTECEDENTES .....                                                                                                       | 21 |
| I.3           | OBJETIVOS.....                                                                                                           | 25 |
| I.3.1         | Objetivo general .....                                                                                                   | 25 |
| I.3.2         | Objetivos específicos .....                                                                                              | 26 |
| CAPÍTULO II.  | MARCO TEÓRICO.....                                                                                                       | 27 |
| II.1          | GAS NATURAL.....                                                                                                         | 27 |
| II.2          | USOS DEL GAS NATURAL.....                                                                                                | 28 |
| II.3          | RECOLECCIÓN DEL GAS NATURAL.....                                                                                         | 29 |
| II.4          | PROCESAMIENTO DEL GAS NATURAL.....                                                                                       | 30 |
| II.5          | QUEMA Y VENTEO DEL GAS NATURAL.....                                                                                      | 35 |
| II.6          | ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN.....                                                                                            | 37 |
| II.7          | PUNTO DE EQUILIBRIO.....                                                                                                 | 38 |
| II.8          | MÉTODO GRÁFICO DEL PUNTO DE EQUILIBRIO.....                                                                              | 39 |
| CAPÍTULO III. | MARCO METODOLÓGICO .....                                                                                                 | 43 |
| III.1         | RECOPIACIÓN DE LA DATA.....                                                                                              | 43 |
| III.2         | DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DEL PROCESO.....                                                                           | 45 |
| III.3         | ESTABLECIMIENTO DEL CASO BASE.....                                                                                       | 46 |
| III.4         | ELABORACIÓN DEL ESQUEMA DEL SISTEMA DE VALORIZACIÓN<br>DEL GAS NATURAL.....                                              | 48 |
| III.5         | DETERMINACIÓN DE LA GANANCIA PARA CADA UNA DE LAS<br>ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS<br>NATURAL..... | 49 |

|        |                                                                                                                                        |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.6  | DETERMINACIÓN DE LA RENTABILIDAD PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL.....                 | 50 |
| III.7  | ESTABLECIMIENTO DE LOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN .....                                                                                  | 51 |
| III.8  | EVALUACIÓN DE LOS CASOS.....                                                                                                           | 51 |
| III.9  | COMPARACIÓN ENTRE LOS CASOS.....                                                                                                       | 52 |
| III.10 | DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....                                                                                                           | 52 |
| III.11 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....                                                                                                    | 52 |
|        | CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....                                                                                 | 53 |
| IV.1   | DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DEL PROCESO.....                                                                                         | 53 |
| IV.2   | CASO BASE.....                                                                                                                         | 54 |
| IV.3   | CÁLCULO DE LA GANANCIA PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL NACIONAL .....         | 55 |
| IV.4   | CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL NACIONAL.....      | 56 |
| IV.5   | CÁLCULO DE LA GANANCIA PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL INTERNACIONAL.....     | 58 |
| IV.6   | CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL INTERNACIONAL..... | 59 |
| IV.7   | EVALUACIÓN DE LOS CASOS.....                                                                                                           | 59 |
| IV.7.1 | ESCENARIO DE PRODUCCIÓN 1.....                                                                                                         | 60 |
| IV.7.2 | ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN 2.....                                                                                                        | 68 |
| IV.8   | COMPARACIÓN ENTRE LOS CASOS.....                                                                                                       | 76 |
|        | CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....                                                                                       | 78 |
| V.1    | CONCLUSIONES.....                                                                                                                      | 78 |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| V.2 | RECOMENDACIONES .....                                                                                                                                                                                                                                          | 80  |
|     | CAPÍTULO VI. BIBLIOGRAFÍA .....                                                                                                                                                                                                                                | 81  |
|     | [ANEXO 1] METODOLOGÍA Y ECUACIONES UTILIZADAS PARA LA<br>CONSTRUCCIÓN DE LAS GRÁFICAS DE RENTABILIDAD EN FUNCIÓN DE<br>LA CAPACIDAD DE PLANTA PARA CADA ETAPA QUE CONFORMA LA<br>RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL NACIONAL E<br>INTERNACIONAL ..... | 84  |
|     | [ANEXO 2] TABLAS UTILIZADAS PARA GRAFICAR EL PUNTO DE<br>EQUILIBRIO DE LAS CURVAS DE RENTABILIDAD EN FUNCIÓN DE LA<br>CAPACIDAD DE PLANTA PARA CADA ETAPA QUE CONFORMA LA RED<br>DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL NACIONAL E<br>INTERNACIONAL.....      | 104 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura N°. 1. Ranking de Reservas Probadas de Gas Natural.....                                                                     | 16 |
| Figura N°. 2. Reservas Probadas de Gas Natural en Venezuela.....                                                                   | 17 |
| Figura N°. 3. Distribución Geográfica por Cuencas de las Reservas Probadas de Gas Natural en Venezuela.....                        | 18 |
| Figura N°.4. Ubicación de las Reservas Probadas de Gas Natural en Venezuela.....                                                   | 18 |
| Figura N°.5. Remoción de Condensados.....                                                                                          | 31 |
| Figura N°.6. Deshidratador con Etilenglicol.....                                                                                   | 33 |
| Figura N°.7. Procesamiento del Gas Natural.....                                                                                    | 34 |
| Figura N°.8. Punto de Equilibrio.....                                                                                              | 40 |
| Figura N°.9. Red de Valorización del Gas Natural.....                                                                              | 48 |
| Figura N°.10. Curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas vehicular a nivel nacional.....                            | 60 |
| Figura N°.11. Punto de equilibrio de la curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas vehicular a nivel nacional.....  | 61 |
| Figura N°.12. Curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas industrial a nivel nacional.....                           | 62 |
| Figura N°.13. Punto de equilibrio de la curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas industrial a nivel nacional..... | 63 |
| Figura N°.14. Curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas doméstico a nivel nacional.....                            | 64 |
| Figura N°.15. Punto de equilibrio de la curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas doméstico a nivel nacional.....  | 65 |
| Figura N°.16. Curva de capacidad en función de la rentabilidad del gas para producción de energía a nivel nacional.....            | 66 |

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura N°.17. Punto de equilibrio de la curva de capacidad en función de la rentabilidad del gas para producción de energía a nivel nacional.....      | 67 |
| Figura N°.18. Curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas vehicular a nivel internacional.....                                           | 68 |
| Figura N°.19. Punto de equilibrio de la curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas vehicular a nivel internacional.....                 | 69 |
| Figura N°.20. Curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas industrial a nivel internacional.....                                          | 70 |
| Figura N°.21. Punto de equilibrio de la curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas industrial a nivel internacional.....                | 71 |
| Figura N°.22. Curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas doméstico a nivel internacional.....                                           | 72 |
| Figura N°.23. Punto de equilibrio de la curva de capacidad en función de la rentabilidad para gas doméstico a nivel internacional.....                 | 73 |
| Figura N°.24. Curva de capacidad en función de la rentabilidad del gas para producción de energía a nivel internacional.....                           | 74 |
| Figura N°.25. Punto de equilibrio de la curva de capacidad en función de la rentabilidad del gas para producción de energía a nivel internacional..... | 75 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla N° 1. Especificaciones de Calidad del Gas Natural.....                                                                                                                              | 19 |
| Tabla N° 2. Balance general 2009 en el distrito norte “El Furrial”.....                                                                                                                   | 21 |
| Tabla N°3. Gas de quema y/o venteo en las instalaciones del distrito "El Furrial".....                                                                                                    | 21 |
| Tabla N°4. Requerimientos energéticos por localidad de las comunidades del distrito norte.....                                                                                            | 22 |
| Tabla N° 5. Balance de gas por cada área de la zona de oriente.....                                                                                                                       | 36 |
| Tabla N° 6. Condiciones del gas a utilizar.....                                                                                                                                           | 43 |
| Tabla N° 7. Composición del gas a utilizar.....                                                                                                                                           | 44 |
| Tabla N° 8. Costos de las fases de tratamiento y separación de los gases de quema y/o venteo.....                                                                                         | 45 |
| Tabla N° 9. Precios de venta de los productos a nivel nacional.....                                                                                                                       | 47 |
| Tabla N° 10. Cantidad obtenida por producto a nivel nacional.....                                                                                                                         | 47 |
| Tabla N° 11. Precios de venta del gas metano a nivel nacional e internacional.....                                                                                                        | 49 |
| Tabla N° 12. Caso base.....                                                                                                                                                               | 54 |
| Tabla N° 13. Ganancia obtenida en cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h.....      | 55 |
| Tabla N° 14. Rentabilidad obtenida en cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h.....  | 56 |
| Tabla N° 15. Precio de venta de los productos a nivel internacional.....                                                                                                                  | 57 |
| Tabla N° 16. Ganancia obtenida en cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel internacional para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h..... | 58 |

|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla N°17. Rentabilidad obtenida en cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel internacional para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h..... | 59  |
| Tabla N° 18. Puntos de equilibrio para cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional e internacional.....                                     | 76  |
| Tabla N° 19. Ganancias obtenidas para gas vehicular a nivel nacional.....                                                                                                                    | 85  |
| Tabla N° 20. Ganancias obtenidas para gas vehicular a nivel internacional.....                                                                                                               | 86  |
| Tabla N° 21. Ganancias obtenidas para gas industrial a nivel nacional.....                                                                                                                   | 87  |
| Tabla N° 22. Ganancias obtenidas para gas industrial a nivel internacional.....                                                                                                              | 88  |
| Tabla N° 23. Ganancias obtenidas para gas doméstico a nivel nacional.....                                                                                                                    | 89  |
| Tabla N° 24. Ganancias obtenidas para gas doméstico a nivel internacional.....                                                                                                               | 90  |
| Tabla N° 25. Ganancias obtenidas del gas para producción de energía a nivel nacional.....                                                                                                    | 91  |
| Tabla N° 26. Ganancias obtenidas del gas para producción de energía a nivel internacional.....                                                                                               | 92  |
| Tabla N° 27. Costos totales obtenidos para todas las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional e internacional.....                                       | 94  |
| Tabla N° 28. Rentabilidad obtenida para el caso de gas vehicular a nivel nacional.....                                                                                                       | 96  |
| Tabla N° 29. Rentabilidad obtenida para el caso de gas vehicular a nivel internacional.....                                                                                                  | 97  |
| Tabla N° 30. Rentabilidad obtenida para el caso de gas industrial a nivel nacional.....                                                                                                      | 98  |
| Tabla N° 31. Rentabilidad obtenida para el caso de gas industrial a nivel nacional.....                                                                                                      | 99  |
| Tabla N° 32. Rentabilidad obtenida para el caso de gas doméstico a nivel nacional.....                                                                                                       | 100 |
| Tabla N° 33. Rentabilidad obtenida para el caso de gas doméstico a nivel internacional.....                                                                                                  | 101 |

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla N° 34. Rentabilidad obtenida para el caso del gas para producción de energía a nivel nacional.....                                                                     | 102 |
| Tabla N° 35. Rentabilidad obtenida para el caso del gas para producción de energía a nivel internacional.....                                                                | 103 |
| Tabla N° 36. Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas vehicular a nivel nacional.....                      | 104 |
| Tabla N° 37. Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas industrial a nivel nacional.....                     | 105 |
| Tabla N° 38. Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas doméstico a nivel nacional.....                      | 106 |
| Tabla N° 39. Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel nacional.....      | 107 |
| Tabla N° 40. Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas vehicular a nivel internacional.....                 | 108 |
| Tabla N° 41. Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas industrial a nivel internacional.....                | 109 |
| Tabla N° 42. Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas doméstico a nivel internacional.....                 | 110 |
| Tabla N° 43. Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel internacional..... | 111 |

## INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Especial de Grado tiene como objetivo, valorizar el gas natural de quema y/o venteo bajo distintos escenarios de producción en el oriente venezolano, mediante la construcción de curvas económicas con el propósito de evaluar cuál de ellos genera el mejor beneficio para el uso del gas natural. Para lograr lo antes expuesto, se recopiló la data del gas venteado reportado por la Ing. Nastenka Azuaje en su Trabajo de Maestría (2010), y los costos asociados en cuanto al tratamiento y separación de los gases de quema y/o venteo fueron extraídos del Trabajo Especial de Grado (2013) de la Ing. Álvarez Sabrina y la Ing. Carruido Marifé, posteriormente se llevó a cabo un estudio bibliográfico acerca de las fases de la construcción y análisis de escenarios de producción para luego plantear dos escenarios que permitan el aprovechamiento de los gases de quema y/o venteo en el oriente del país.

Para la evaluación de los escenarios, se estableció que la capacidad máxima de gas a procesar será de 1,847 Tmol/h a un costo total de inversión de 28.797.679 (caso base) y a partir de esta premisa se realizaron las perspectivas económicas para cada uno de los fines con el objetivo de construir las gráficas capacidad en función de la rentabilidad con el propósito de determinar la rentabilidad del proceso a través de la identificación del punto de equilibrio.

Al evaluar el escenario 1 mediante el cálculo del punto de equilibrio, se determinó que al manejar los precios regulados en Venezuela, procesar una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) en cualquiera que sea el caso no resulta rentable ya que esta capacidad siempre se encuentra por debajo del punto de equilibrio, generando pérdidas constantes. Al realizar el mismo análisis para el escenario 2 se determinó que al manejar los precios a nivel internacional el proceso resulta económicamente rentable ya que la capacidad de interés, se encuentra siempre por encima del punto de equilibrio, obteniendo utilidades.

Finalmente, se determinó que el escenario de producción 2 es donde se obtienen los mejores beneficios para el uso del gas natural.

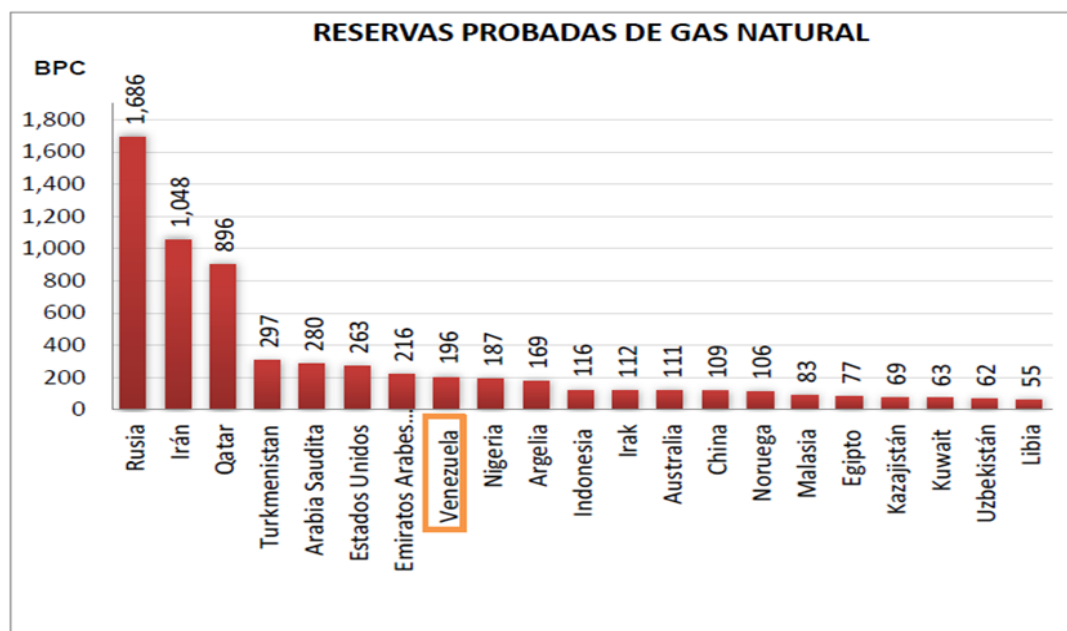
## CAPÍTULO I

### FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

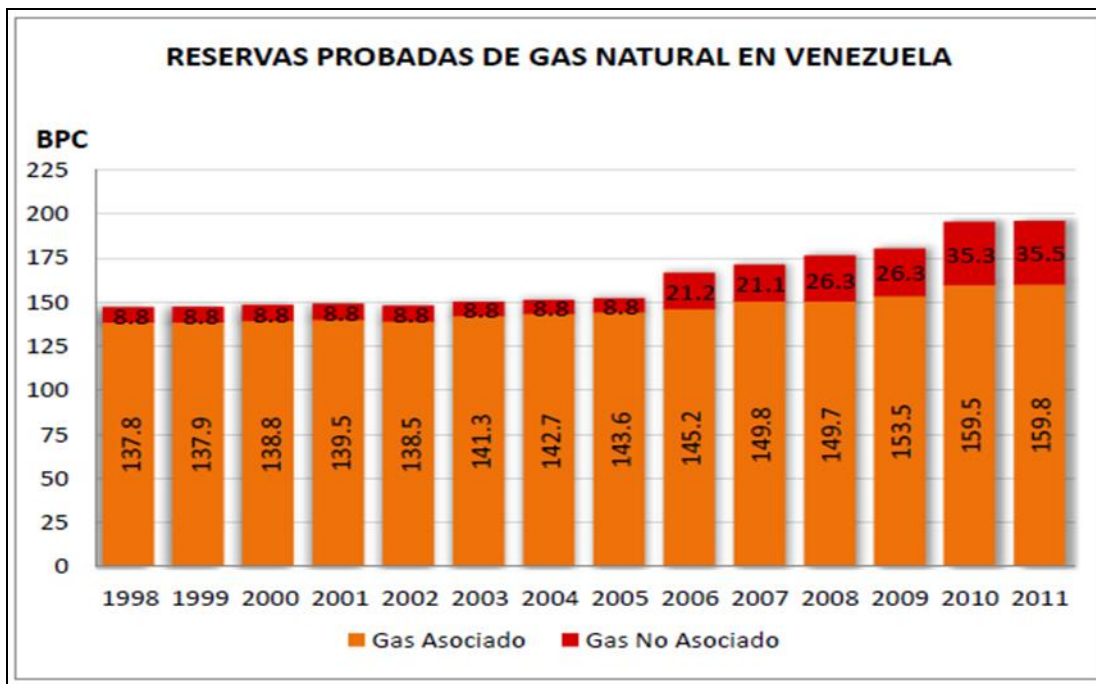
El gas natural ha pasado a ocupar un importante espacio en el escenario energético mundial, con un crecimiento continuo de la demanda. Venezuela está considerada como una de las naciones más importantes como potencial suplidor de energía gasífera por sus cuantiosas reservas de gas, su ventajosa posición geográfica e importancia geopolítica (PDVSA, 2013).

En la actualidad Venezuela ocupa el primer lugar en América Latina y el Caribe en reservas probadas de gas natural y a escala mundial se posiciona en el octavo lugar, tal y como se muestra en la Figura N°1.



**Figura N°1.** Ranking de Reservas Probadas de Gas Natural (PDVSA, 2011)

Las reservas probadas de gas natural en Venezuela, para el año 2011, alcanzaron los 195,2 BPC según el Balance de Gestión Social y Ambiental de PDVSA, con un importante incremento desde el año 2005 del 28%, como se muestra en la Figura N°2.

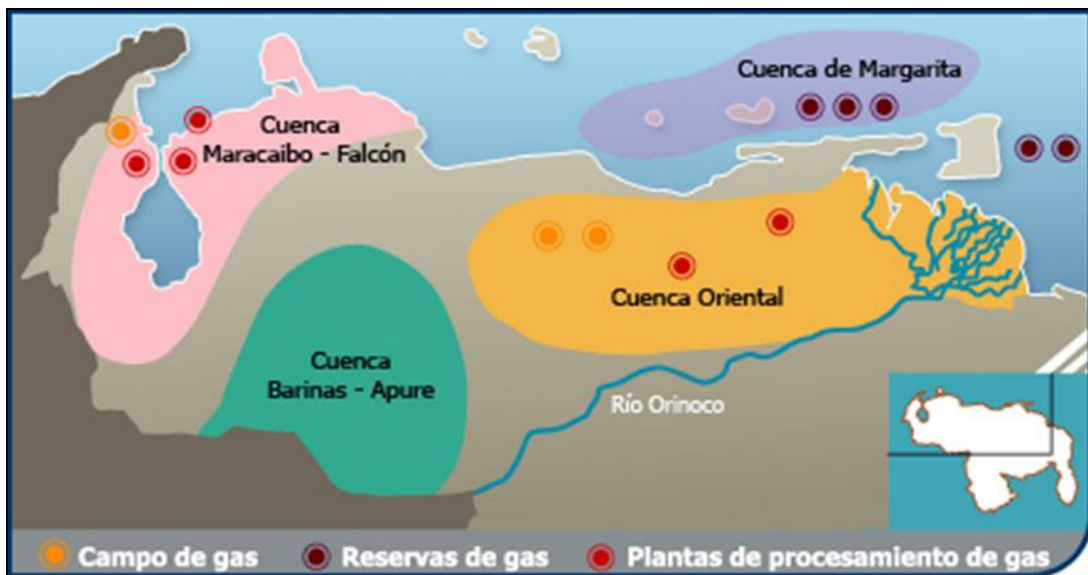


**Figura N°2.** Reservas Probadas de Gas Natural en Venezuela (PDVSA, 2011)

La distribución geográfica en Venezuela por cuencas de las reservas probadas de gas natural es la siguiente:

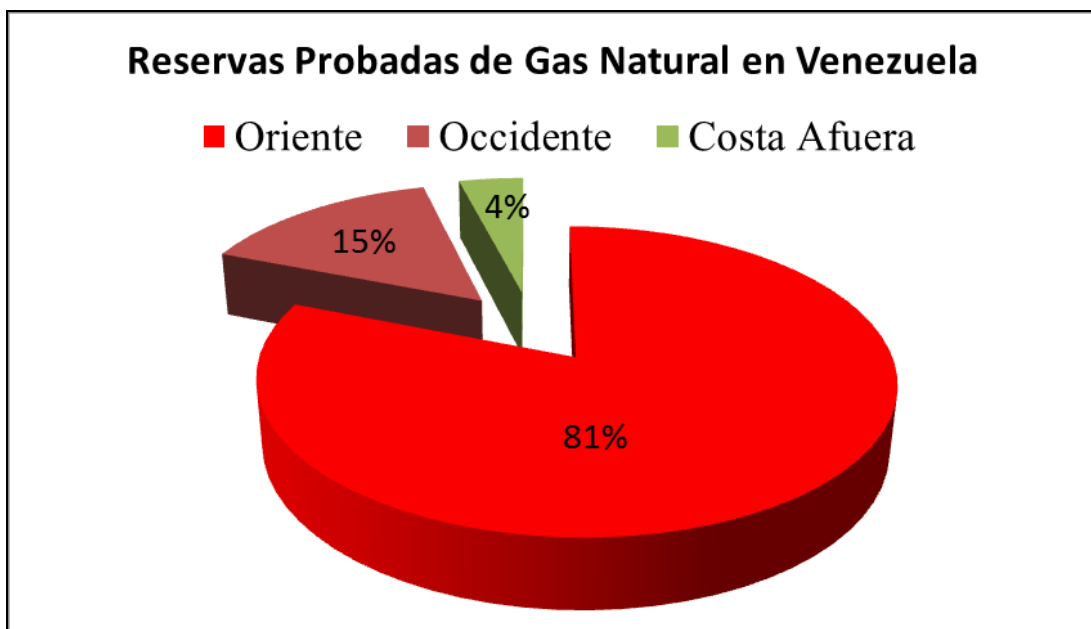
- ❖ Maracaibo – Falcón: 34,02 BPC
- ❖ Barinas – Apure: 0,37 BPC
- ❖ Oriental: 145,95 BPC
- ❖ Margarita: 14,7 BPC

En la figura N°3, se muestra la distribución geográfica por cuencas.



**Figura N°3.** Distribución Geográfica por Cuencas de las Reservas Probadas de Gas Natural en Venezuela (PDVSA, 2011)

En la Figura N°4, se observa que el mayor volumen de reservas del país correspondiente al 81%, está localizado en el Oriente, el 15% corresponde a Occidente y el resto a Costa Afuera con un 4%



**Figura N°4.** Ubicación de las Reservas Probadas de Gas Natural en Venezuela

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos ligeros compuesta principalmente de metano ( $\text{CH}_4$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), butanos ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) y pentanos ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), aunque también se pueden encontrar otros componentes tales como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el helio ( $\text{He}$ ), el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ). Su composición no es constante, el componente principal siempre será el metano, el cual se debe encontrar en un porcentaje mínimo del 80% de acuerdo a la norma COVENIN 3568-2:2000. Esta norma establece las especificaciones mínimas de calidad del gas natural para su uso, manejo y transporte. En la tabla N°1 a continuación, se describen tales especificaciones.

**Tabla N°1.** Especificaciones de Calidad del Gas Natural

|                                                               | <b>VALORES</b>                                                  |                        |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>COMPONENTES</b>                                            | <b>MÍNIMO</b>                                                   | <b>MÁXIMO</b>          |
| <b>Sulfuro de Hidrógeno (<math>\text{H}_2\text{S}</math>)</b> | --                                                              | <b>4,16 ppm molar</b>  |
| <b>Monóxido de Carbono (<math>\text{CO}</math>)</b>           | --                                                              | <b>0,1% molar</b>      |
| <b>Dióxido de Carbono (<math>\text{CO}_2</math>)</b>          | --                                                              | <b>2% molar</b>        |
| <b>Agua (<math>\text{H}_2\text{O}</math>)</b>                 | --                                                              | <b>5,625 lb/MMPC</b>   |
| <b>Nitrógeno (<math>\text{N}_2</math>)</b>                    | --                                                              | <b>1% molar</b>        |
| <b>Hidrógeno (<math>\text{H}_2</math>)</b>                    | --                                                              | <b>0,1% molar</b>      |
| <b>Oxígeno (<math>\text{O}_2</math>)</b>                      | --                                                              | <b>0,1% molar</b>      |
| <b>Azufre Total</b>                                           | --                                                              | <b>18,42 ppm molar</b> |
| <b>Mercurio (<math>\text{Hg}</math>)</b>                      | <b>menores de 0,01 <math>\mu\text{g}/\text{Nm}^3</math></b>     |                        |
| <b>Metano (<math>\text{CH}_4</math>)</b>                      | <b>80% molar</b>                                                | --                     |
| <b>Etano (<math>\text{C}_2\text{H}_6</math>)</b>              | --                                                              | <b>12% molar</b>       |
| <b>Propano (<math>\text{C}_3\text{H}_8</math>)</b>            | --                                                              | <b>3% molar</b>        |
| <b>Butano+ (<math>\text{C}_4\text{H}_{10+}</math>)</b>        | --                                                              | <b>1,5% molar</b>      |
| <b>Hidrocarburos Insaturados</b>                              | --                                                              | <b>0,2% molar</b>      |
|                                                               | <b>VALORES</b>                                                  |                        |
| <b>PARÁMETROS</b>                                             | <b>MÍNIMO</b>                                                   | <b>MÁXIMO</b>          |
| <b>Poder Calorífico Bruto</b>                                 | <b>950 BTU/PC</b>                                               | <b>1148 BTU/PC</b>     |
| <b>Temperatura de Rocío</b>                                   | <b>Diferencial 20°C con respecto a la Temperatura Ambiental</b> |                        |
| <b>Índice de Wobbe</b>                                        | <b>1312,97 BTU/PC</b>                                           | <b>1392,65 BTU/PC</b>  |

Fuente: Ente Nacional del Gas, 2012

Debido al incremento en la demanda de los recursos energéticos a nivel mundial, es necesario la búsqueda de alternativas, estrategias y/o esquemas energéticos para el mejor aprovechamiento de los recursos existentes, reduciendo al máximo la quema y venteo de gas natural (Rodríguez, 2010).

La quema y/o venteo del gas se utiliza generalmente para eliminar el gas natural que no es posible procesar bien sea por la carencia de instalaciones, por ser un gas fuera de especificación para su uso y por tener muy baja presión durante la extracción y procesamiento del petróleo crudo ( $< 250$  psia). Independientemente del mecanismo que se adopte, la liberación de este gas genera dos posibles escenarios, a saber: el primero es la pérdida de una fuente natural de energía y el segundo es el efecto perjudicial al ambiente. (García, 2007).

Una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial es la quema y/o venteo de gases. Estos gases poseen un alto valor energético que puede ser aprovechado, una vez limpios de contaminantes y luego pueden ser fraccionados en subproductos de alto valor agregado, como lo son el metano, etano, propano, butanos y  $C_5^+$ . Por lo cual es posible generar distintos escenarios de producción y explotación de este gas que generen alta rentabilidad y factibilidad técnica y económica para su aprovechamiento.

A nivel nacional existen actualmente propuestas para el aprovechamiento del gas de quema y/o venteo, las cuales deben considerar escenarios donde se evalúe precios internacionales del gas, precios de la energía en Venezuela y la reinyección de este gas a los sistemas de producción de crudo. Por lo cual en este trabajo especial de grado surge la necesidad de realizar un estudio, que permita el desarrollo de procesos de acondicionamiento de gases de quema y/o venteo en el oriente del país para su posterior aprovechamiento con el objetivo de minimizar los contaminantes, maximizar la producción de energía con corrientes gasíferas permanentes y optimizar los subproductos de corrientes de bajo valor.

## I.2 ANTECEDENTES

**La Rosa, Lorena (2010).** El objetivo general del Trabajo de Postgrado desarrollado por Lorena La Rosa fue contribuir en la visualización de escenarios para el aprovechamiento del gas asociado, destinado a la quema y/o venteo en las instalaciones petroleras del Norte de Monagas, mediante la identificación de alternativas tecnológicas que permitan la valorización como gas combustible, que pudiera mejorar la calidad de vida de las comunidades aledañas a dichas instalaciones. Entre los resultados más importantes obtenidos, presentó un balance general (2009) del Distrito Norte “El Furrial” mostrado en la Tabla N°2, donde se aprecia la cantidad de gas venteado y gas producido, así como también presentó información más detallada de la distribución de gas de quema y/o venteo dentro del Distrito ” El Furrial”, determinando que la estación de flujo Jusepín contribuye con cantidades más considerables al venteo del gas natural, esta distribución es mostrada en la Tabla N°3.

**Tabla N° 2.** Balance General 2009 en el Distrito Norte: “El Furrial”

| <b>Distrito “El Furrial”</b> | <b>Cantidades en MMPCD</b> |
|------------------------------|----------------------------|
| <b>928</b>                   | Gas Producido              |
| <b>791</b>                   | Gas Disponible             |
| <b>111</b>                   | Gas Venteado               |

**Fuente:** La Rosa, 2010

**Tabla N°3.** Gas de Quema y/o Venteo en las instalaciones del Distrito “El Furrial”

| <b>INSTALACION</b> | <b>ENE</b> | <b>FEB</b> | <b>MAR</b> | <b>ABR</b> | <b>MAY</b> | <b>JUN</b> | <b>JUL</b> | <b>AGO</b> | <b>SEP</b> | <b>PROM</b> |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| <b>Jusepín</b>     | <b>70</b>  | <b>39</b>  | <b>93</b>  | <b>109</b> | <b>95</b>  | <b>107</b> | <b>125</b> | <b>95</b>  | <b>111</b> | <b>94</b>   |
| <b>Orocual</b>     | 17         | 16         | 31         | 25         | 9          | 7          | 7          | 17         | 18         | 16          |
| <b>Rusio Viejo</b> | N/D        | N/D        | N/D        | N/D        | N/D        | N/D        | N/D        | 1          | 1          | 1           |
| <b>TOTAL</b>       | 87         | 55         | 124        | 134        | 104        | 114        | 132        | 113        | 130        | 111         |

**Fuente:** La Rosa, 2010

**Rodríguez, Karem (2010).** En su Trabajo de Maestría, realizó un estudio donde se aprovechó el gas de quema y venteo en la generación de electricidad para satisfacer necesidades energéticas en comunidades aledañas a las instalaciones del Distrito Norte del Estado Monagas. En dicho trabajo se describe de forma general, el proceso de la industria del gas en todas sus etapas, se exponen las tecnologías disponibles para la generación de energía eléctrica a partir del gas natural: turbina a gas, ciclo combinado, grupos electrógenos, micro-turbina, pilas de combustibles. Ventajas y desventajas. Comparación entre las tecnologías (incluyendo la comparación de las emisiones). Para esto se recopiló, revisó y clasificó material de referencia para la realización de una matriz de selección en los cuales se usaron los criterios de viabilidad, conocimiento, manejo, costos y consideraciones ambientales con la finalidad de seleccionar la tecnología que mejor se adaptase a la resolución del problema eléctrico que se reportó en las comunidades aledañas a las instalaciones antes mencionadas.

Entre los resultados más importantes, se presentan en la Tabla N°4, los valores obtenidos en cuanto a los requerimientos energéticos en las comunidades del Distrito Norte.

**Tabla N° 4.** Requerimientos Energéticos por Localidad de las Comunidades del Distrito Norte

| <b>LOCALIDAD</b>     | <b>POBLACION</b> | <b>N° DE HOGARES</b> | <b>CONSUMO DIARIO ESTIMADO (MWh)</b> |
|----------------------|------------------|----------------------|--------------------------------------|
| <b>Punta de Mata</b> | 43.322           | 13.962               | 93                                   |
| <b>Tejero</b>        | 11.100           | 3.841                | 25                                   |
| <b>Furrial</b>       | 14.850           | 3.093                | 25                                   |
| <b>Jusepín</b>       | 12.590           | 2.350                | 19                                   |
| <b>Candelaria</b>    | 9.341            | 1.211                | 16                                   |
| <b>Corozo</b>        | 8.543            | 1.153                | 13                                   |
| <b>Orocual</b>       | 4.153            | 641                  | 6                                    |
| <b>La Toscana</b>    | 13.554           | 2.665                | 22                                   |
| <b>Musipán</b>       | 550              | 138                  | 1                                    |
| <b>TOTAL</b>         | <b>118.003</b>   | <b>29.054</b>        | <b>220</b>                           |

**Fuente:** Rodríguez, 2010

Entre las conclusiones generadas, se tiene que al utilizar la tecnología seleccionada para producir electricidad se puede generar empleo para la operación y

mantenimiento de las instalaciones y a su vez se contribuye con el aprovechamiento del gas natural.

**Nastenka, Azuaje (2010).** En su Trabajo de Maestría, expresa que para el 2008, Venezuela contaba con 170,9 BPC de gas natural en reservas probadas, así como también la distribución en el territorio nacional de dichas reservas. Refleja los diversos procesos a los cuales es sometido el gas natural a utilizar: compresión, endulzamiento, deshidratación, extracción de líquidos. Describe las alternativas tecnológicas disponibles en el país para el aprovechamiento del gas natural: proceso de refrigeración mecánica, el proceso de turbo expansión y el proceso de refrigeración mediante Joule-Thompson o mezclas refrigerantes, y presenta las opciones de aprovechamiento para el uso del gas natural: inyección, generación eléctrica, gas doméstico, gas licuado de petróleo (GLP), gas natural vehicular (GNV). En dicho trabajo se coloca a Venezuela como sexto país en quema y/o venteo de gas natural asociado, representando pérdidas de un valioso recurso energético para el país, disminuyendo así su eficiencia energética.

**Gragirena, Kharlys (2011).** En su Trabajo Especial de Grado, propone la valorización del gas de venteo y/o quema proveniente de las instalaciones del Distrito Norte de Monagas (PDVSA) mediante la simulación de ciclos de potencia donde se utilice el gas natural como combustible, estos son: ciclo de potencia de vapor, ciclo Rankine, ciclo Rankine con recalentamiento, ciclo Rankine ideal regenerativo, ciclo Rankine combinado, empleando el *software* de simulación Pro/II™. También plantea un análisis de sensibilidad para determinar la operatividad y funcionalidad del proceso modelado, así como las simulaciones respectivas tanto en condiciones ideales como en condiciones reales, concluyendo que el paquete usado es una herramienta rigurosa y precisa en la simulación del proceso. También se evaluó y comparó la eficiencia del Ciclo de Rankine Ideal y con Recalentamiento con respecto al Ciclo de

Rankine Combinado, concluyendo que hubo una diferencia considerable en la eficiencia entre estos ciclos así como también que la disminución de la eficiencia del Ciclo de Rankine Combinado es mayor.

**García, Franklin (2011).** En su Trabajo Especial de Grado, realizó una estimación técnico económica de la separación de los compuestos de gas licuado de petróleo a partir de gases de quema y/o venteo en el oriente del país, obteniendo como resultados que el gas natural de baja presión venteado y/o quemado puede ser fraccionado en subproductos de mayor valor agregado y la tecnología que mejor se ajusta para llevar esto a cabo fue la de turbo-expansores. Además concluyó que el costo de planta instalada fue de 6,8 MMUSD para una corriente de gas de entrada de 4682 Kmol/ h.

**Medina, Fernando (2012).** En su Trabajo Especial de Grado, realizó el estudio y determinación de los parámetros óptimos de operación de una planta para procesar el gas natural que se ventea y/o quema en el oriente del país, mediante un análisis técnico-económico de rentabilidad y producción, separando los gases livianos del gas licuado de petróleo (propano, butano, pentano, y más pesados) del Distrito Norte del estado Monagas, para su aprovechamiento energético, obteniendo como resultado que el gas que es quemado y/o venteado resulta económicamente rentable para su aprovechamiento, extracción de livianos y venta de subproductos asociados, siempre y cuando se cuente con un adecuado sistema de regeneración de solvente. También concluyó que los costos de adquisición y los costos de instalación, determinan la rentabilidad del proceso simulado para el aprovechamiento del gas residual y venta de líquidos del gas natural para una corriente de gas de entrada de  $10,36 \cdot 10^3$  lbmol/h con un costo de capacidad de planta instalada de 14.332 miles de USD.

**Álvarez, Sabrina (2013).** En su Trabajo Especial de Grado, determinó la viabilidad de la separación de los gases de quema y/o venteo en los distritos del Lago norte y

Sur de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo para transfórmalos en subproductos de alto valor agregado. Para lograr este objetivo aplicó la herramienta de simulación HYSYS para simular el proceso, una vez escogida la mejor tecnología (Turbo Expansión), a través de una matriz de selección de tecnología. Adicionalmente presentó un análisis de sensibilidad variando el flujo de alimentación del proceso en un 15% por encima y por debajo respectivamente, lo que le permitió realizar ajustes en algunos equipos que presentaron problemas al aumentar el flujo, posteriormente realizó una integración térmica y finalmente una estimación de la inversión inicial de la planta la cual fue de 10080,56 (MU\$) para luego concluir que el proceso era rentable, con un total de ganancias de 150,6 MM\$.

**Carruido, Marifé (2013).** En su Trabajo Especial de Grado, realizó la determinación de los parámetros de operación de una planta de tratamiento de gases de quema y/o venteo en los Distritos del Lago Norte y Sur de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo para su aprovechamiento. Para lograr este objetivo, aplicó la herramienta de simulación HYSYS y realizó la selección de tecnologías mediante la aplicación de una matriz de selección donde la tecnología seleccionada fue la de Solventes Químicos. Posteriormente realizó un análisis de sensibilidad en el que se estableció la variación del flujo de alimentación del gas agrio en un 15% por exceso y por defecto. Por último se estimó la factibilidad económica del proceso en estudio en función a la inversión inicial la cual fue de 14960,90 (MUSD) y las ganancias por los productos obtenidos.

### **I.3 OBJETIVOS**

En base a la información presentada, en este Trabajo de Grado se plantea el siguiente objetivo general y los objetivos específicos.

#### **I.3.1 Objetivo general**

Evaluar escenarios de producción para el aprovechamiento del gas de quema y/o venteo en el oriente venezolano.

### **I.3.2 Objetivos específicos**

- (a) Esquematizar el sistema de valorización del gas de quema y venteo en el oriente venezolano.
- (b) Estimación de costos del sistema de recolección de gas, tratamiento y separación de los compuestos que conforman el gas de quema y/o venteo.
- (c) Determinar la rentabilidad en función de la capacidad de planta.
- (d) Establecer dos escenarios de producción para el aprovechamiento del gas de quema y/o venteo en el oriente venezolano.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la serie de conceptos teóricos que son necesarios para el entendimiento de los aspectos involucrados en el desarrollo de este proyecto.

#### II.1 GAS NATURAL

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos gaseosos, procedentes de yacimientos de hidrocarburos naturales, cuya producción puede estar o no asociada a la del petróleo crudo, condensados u otros fósiles. Se encuentra en el subsuelo en estructuras geológicas denominadas yacimientos y en las formas de gas natural asociado, el cual está en contacto con el petróleo o disuelto en él y en gas natural no asociado, el cual está en forma gaseosa en los yacimientos y no está asociado a cantidades significativas de petróleo o de condensados (Rodríguez, 2010).

Del Gas Natural se pueden obtener diferentes cortes que son comercialmente valiosos, entre los cuales están: el **Gas Metano**, cuya mezcla de hidrocarburos contiene principalmente metano y cumple, a su vez, con las normas técnicas aplicables para su transporte y comercialización, que puede ser obtenido a través del tratamiento, procesamiento o mezcla del gas, de la refinación del petróleo o de la explotación directa de los yacimientos de hidrocarburos naturales o de otros fósiles; el **Gas Licuado de Petróleo (GLP)**, el cual es la mezcla de hidrocarburos gaseosos, obtenida del procesamiento del gas natural o de la refinación del petróleo, que a condiciones determinadas de presión y temperatura se mantiene en estado líquido, compuesta principalmente de propano, pudiendo contener otros hidrocarburos en menores proporciones, y también se puede obtener los **Líquidos del Gas Natural (LGN)**, los cuales son porciones líquidas obtenidas del gas natural en instalaciones de campo o plantas de procesamiento, incluidos etano, propano, butano, pentano, gasolina natural y condensados de planta (Rodríguez, 2010).

## II.2 USOS DEL GAS NATURAL

El gas natural tiene diversos usos en la rama industrial, comercial y residencial, así como también para el transporte de pasajeros y la generación eléctrica. Ofrece amplias ventajas en el ahorro energético y en procesos industriales que requieren de ambientes limpios, procesos controlados y combustibles altamente eficientes (Ghosh, 2009).

A continuación se muestra la utilidad del gas natural en cada uno de los sectores:

- (a) **Sector Industrial:** el gas natural puede reemplazar ventajosamente a otros combustibles y puede ser utilizado como materia prima. Es altamente eficiente en la fabricación de la cerámica, el cemento y el vidrio. En la industria petroquímica, es utilizado para la producción de fertilizantes, metanol, entre otros. Este combustible puede sustituir a: carbón, gasolina, electricidad, diésel, gas licuado, kerosene y leña. Cuenta con diversas aplicaciones y procesos en: industria del cemento, generación de vapor, secado, industria de alimentos, tratamientos térmicos, sistema de calefacción, generación eléctrica, cocción de productos cerámicos, temple y recocido de metales, cogeneración, fundición de metales, producción de petroquímicos, hornos de fusión.
- (b) **Sector Comercial:** en el sector comercial, se utiliza como combustible en restaurantes, panaderías, lavanderías, hospitales, entre otros.
- (c) **Sector Doméstico:** el gas natural se utiliza en los hogares para la cocina, el servicio de agua caliente y la calefacción.
- (d) **Sector Eléctrico:** el gas natural se ha convertido en el combustible más económico para la generación de electricidad y ofrece las mejores oportunidades en términos de aumento de rendimiento y reducción del impacto ambiental.

- (e) **Sector Automotriz:** generalmente se utiliza el gas natural comprimido (GNC), también conocido con el nombre de gas natural vehicular (GNV) como combustible en vehículos con motores de combustión interna en reemplazo de las gasolinas; tiene bajo costo y menor incidencia en la contaminación ambiental.

### II.3 RECOLECCIÓN DEL GAS NATURAL (GN)

El sistema de recolección constituye el primer eslabón de la cadena de transporte del gas natural. Los compresores se utilizan en aplicaciones de recolección de gas a fin de comprimir el gas natural obtenido de pozos individuales y otras fuentes. El gas se recolecta mediante una red de tuberías y se transfiere a través del gasoducto central hacia la ubicación designada. Estas tuberías de recolección transportan gas natural mezclado con cierto nivel de líquidos de GN, agua y en algunas zonas, contaminantes como el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) (Ariel Corporation, 2013).

El gas natural se puede recolectar de diferentes fuentes; por ejemplo, de un pozo de gas, del gas asociado y condensados, de un pozo de petróleo individual o de la recuperación de vapores REVA (sistema utilizado para evitar la pérdida de vapores de gas al ambiente). Este es transportado a través de tuberías denominados gasoductos, también conocidos como líneas de distribución y recolección de gas, cuyos diámetros dependen del volumen de gas a transferir y la presión requerida de transmisión, su longitud puede variar de cientos de metros a miles de kilómetros, dependiendo de la fuente de origen y el objetivo a donde debe de ser transportado. En los campos petrolíferos y/o gasíferos se habla de gas de baja, mediana y alta presión. Estas designaciones son importantes porque determinan la capacidad o fuerza propia (presión) de flujo que por sí tiene el gas producido de los pozos. La presión hace posible la recolección del gas y su transmisión por tubería (gasoducto) de determinada longitud y diámetro.

## II.4 PROCESAMIENTO DEL GAS NATURAL

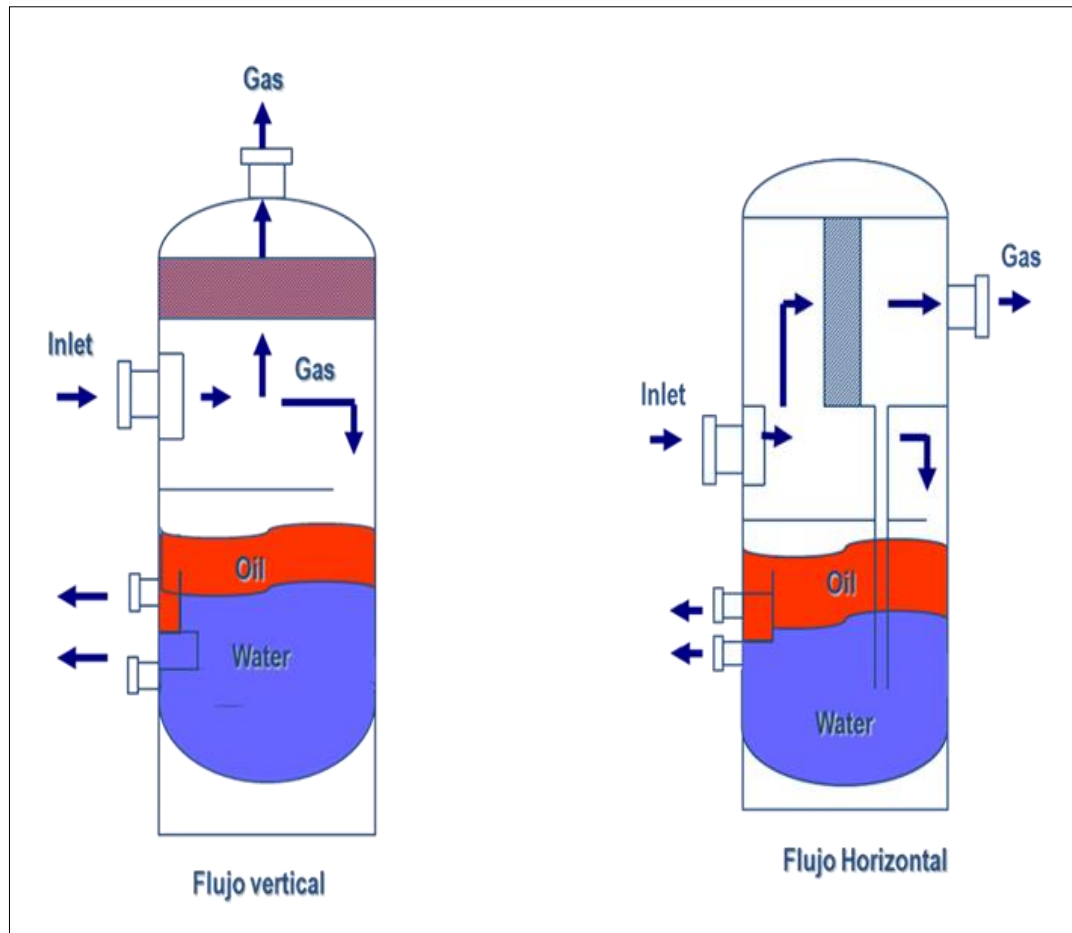
El gas natural que es alimentado en las líneas de tuberías hasta los consumidores debe cumplir ciertas especificaciones antes de ser comercializado. Si este no cumple con las especificaciones mínimas, varios problemas operacionales pueden ocurrir como deterioro y rupturas de las tuberías de transporte del gas (Ghosh, 2009).

Las operaciones necesarias para que el gas natural pueda ser procesado y comercializado se presentan y explican a continuación, se debe destacar que algunas de estas operaciones son opcionales dependiendo de la composición del gas que proviene del pozo (Ghosh, 2009).

(a) **Separador de gas-oleo:** al salir del pozo la mezcla contiene gas natural y crudo la cual se somete a un proceso de reducción de presión para lograr separar el gas del líquido, se usa un tanque cerrado convencional para este procedimiento. El gas logra separarse del líquido por la diferencia de gravedad específica de los compuestos, en algunos casos esta separación debe realizarse en múltiples etapas. Estos separadores son comúnmente conchas cilíndricas montadas horizontalmente con una entrada y salidas por el tope para remover el gas y por el fondo para remover el crudo.

(b) **Remoción de crudo y condensados:** los condensados son removidos de la corriente que proviene del pozo a través del uso de separadores mecánicos. La corriente puede ser alimentada directamente a los separadores si el tanque de separación gas-oleo no se necesita. Un separador de baja temperatura es el más usado frecuentemente en pozos que producen gases de alta presión con crudo liviano, estos equipos usan diferencia de presiones para enfriar el gas húmedo y así separar el crudo y los condensados. El gas entra a altas presiones (600 psig o más) al separador de condensados donde se somete a una expansión brusca que baja la temperatura del mismo logrando condensar la mayoría de los compuestos para poder separarlos. En el caso del gas

asociado al petróleo, es necesario separar el mismo del fluido en el que se encuentra disuelto para facilitar su transporte y el posterior procesamiento. En la Figura N°5 se muestra un ejemplo de cómo son removidos los condensados a través de un separador.



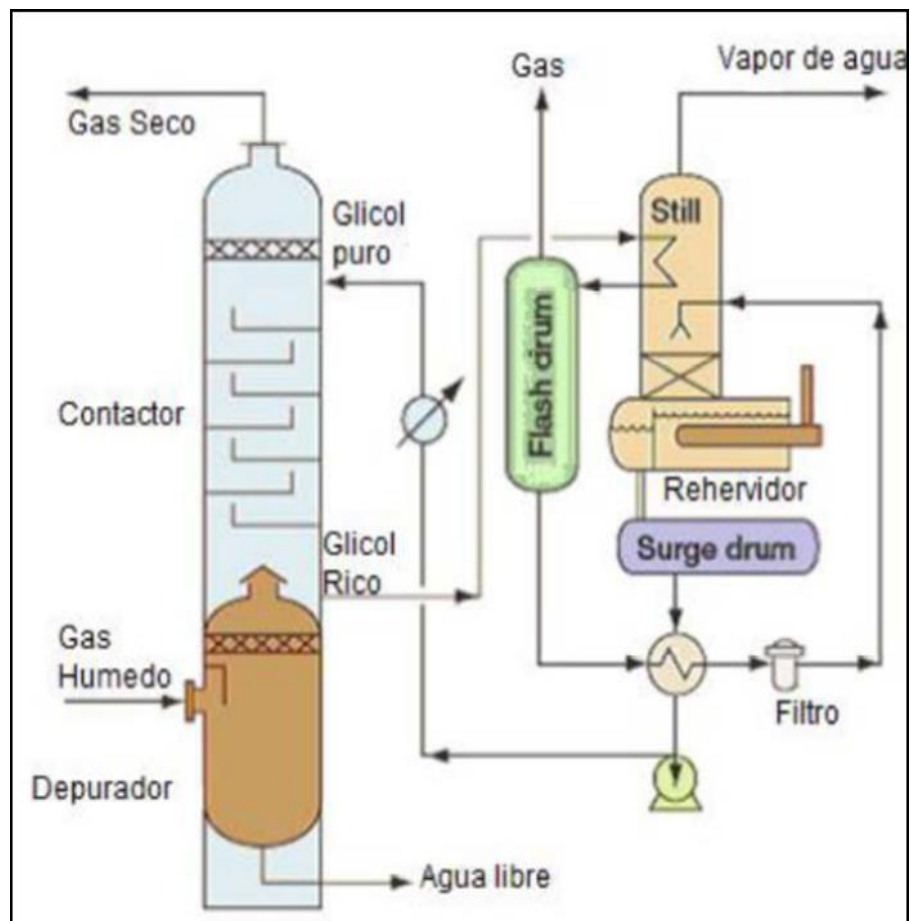
**Figura N°5.** Remoción de Condensados

**Fuente:** Cortesía NATCO GROUP

- (c) **Remoción de contaminantes:** el sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, helio y oxígeno presentes en la corriente de gas natural deben ser removidos de este antes que el mismo sea comercializado o usado como insumo en plantas. En presencia de agua, el dióxido de carbono forma ácido carbonilo

que es corrosivo y también reduce el valor calórico en BTU del gas, el sulfuro de hidrógeno es altamente tóxico y corrosivo para los equipos usados. El endulzamiento del gas natural usando aminas es el proceso comúnmente usado para la remoción de sulfuro de hidrógeno hasta un mínimo de 4ppm y de dióxido de carbono, básicamente se usan soluciones de aminas (monoetanolamina o dietanolamina) que entran por el tope de la torre y retienen los contaminantes, ya que la afinidad de estos es bastante alta, y así obtener un gas dulce que cumple con las restricciones de ambiente y mercadeo. La solución de amina es regenerada para permitir su posterior utilización. El endulzamiento con aminas permite retirar el oxígeno y helio del gas si estos estuvieran presentes.

- (d) **Deshidratación:** la primordial razón de este proceso es remover el agua contenida en la corriente de gas la cual puede formar hidratos, que son partículas sólidas que causan problemas en las tuberías de transporte de los gases ya que ocasionan bloqueos y daños en los expansores. El método frecuentemente empleado para remover agua es el uso de etilenglicol como líquido desecante el cual sirve para absorber el vapor de agua de la corriente de gas. Esencialmente el gas húmedo se pone en contacto con etilenglicol en lo que se conoce como un contactor logrando extraer el agua del gas ya que esta quedará absorbida en el etilenglicol, luego esta mezcla es llevada a calderas que retiran el exceso de agua. Se puede usar un separador flash, que reduce la presión permitiendo que el metano e hidrocarburos livianos vaporicen, antes de las calderas para lograr separar las pequeñas cantidades de gas que el etilenglicol arrastra en el proceso de absorción y así aumentar la eficiencia del proceso. En la Figura N°6 presentada a continuación se muestra un deshidratador el cual utiliza etilenglicol como líquido desecante para remover el agua contenida en el gas.



**Figura N°6.** Deshidratador con Etilenglicol

**Fuente:** Bahadori, 2009

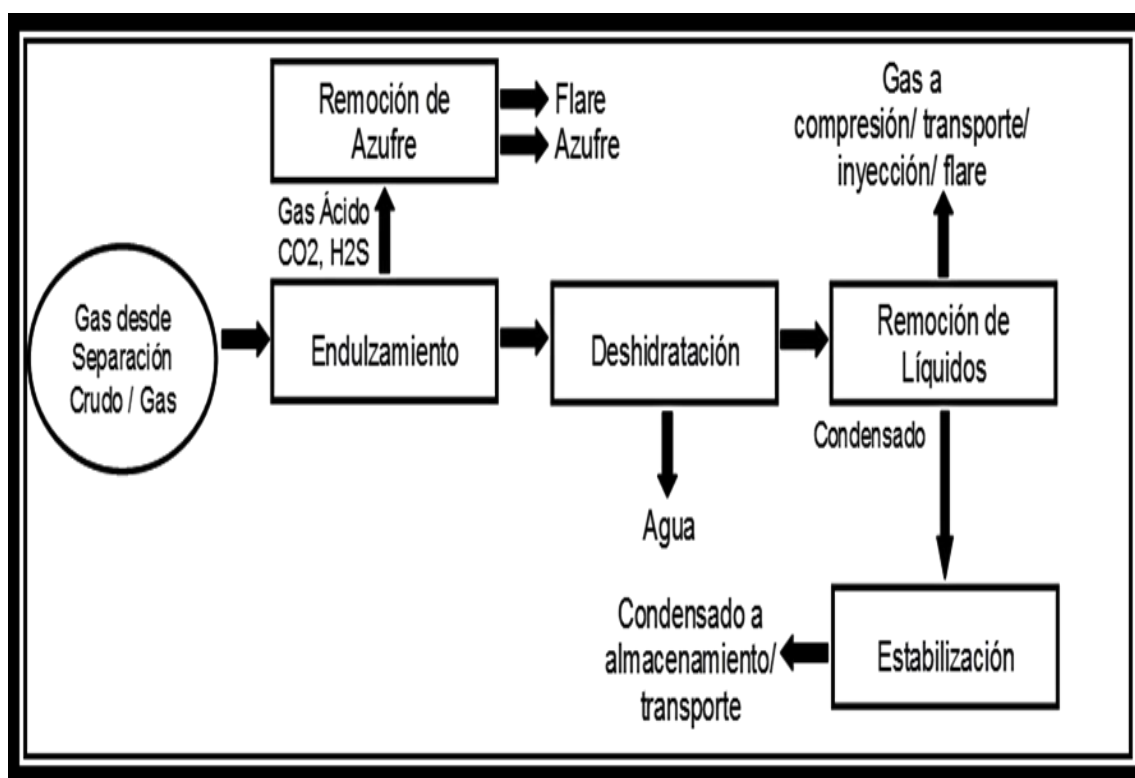
También pueden ser usados sólidos desecantes, los cuales consisten en una torre de adsorción donde el gas entra por el fondo de la torre y sale por el tope deshidratado, la torre contiene alúmina activada o un material granular de gel de sílice como adsorbedor. Normalmente se usan dos torres adsorbedoras las cuales se intercambian cuando la que está en operación deja de aportar gas cerca de las restricciones a agua mínimas debido a que el equipo necesita ser regenerado.

- (e) **Extracción de nitrógeno:** para retirar este inerte del gas, la corriente entra en una unidad de eliminación de nitrógeno (NRU), el cual separa y ventea el nitrógeno criogénicamente. Otro tipo de planta separa el metano y los

hidrocarburos pesados del nitrógeno usando un solvente absorbedor, y luego estos son separados usando un tanque flash.

- (f) **Extracción y Fraccionamiento:** una vez que el gas natural se encuentra libre de componentes que puedan entorpecer o evitar su libre procesamiento aguas abajo, se procede a separar los hidrocarburos líquidos del gas para luego fraccionarlos en torres de destilación y obtener productos de mayor valor agregado.

En la Figura N°7 se puede observar de manera general el procesamiento del gas natural.



**Figura N°7.** Procesamiento del Gas Natural

**Fuente:** OPICA, 2009

## II.5 QUEMA Y VENTEO DEL GAS NATURAL

El gas asociado que emerge junto al crudo a la superficie durante la producción de petróleo, se elimina a veces en las instalaciones en tierra, venteándolo o quemándolo a la atmósfera.

Se denomina quema a la combustión controlada del gas natural en operaciones rutinarias durante el procesamiento de crudo y gas, la cual ocurre al final de la línea donde se encuentra el mechurrio o flama. Éste gas genera mayormente vapor de agua y dióxido de carbono.

El venteo es la liberación controlada de gases a la atmósfera en el transcurso de las operaciones de producción de gas y petróleo. Estos gases pueden ser gas natural o algún otro vapor de hidrocarburo, vapor de agua, así como también, dióxido de carbono separados en el procesamiento del petróleo o gas natural. En el venteo, el gas natural asociado a la producción de petróleo es liberado directamente a la atmósfera y no es quemado. Un venteo seguro se garantiza cuando el gas es liberado a alta presión y el mismo es más ligero que el aire (Kearns, Armstrong y otros, 2000).

El venteo del gas natural puede deberse a diversas causas:

- (a) Por no existir instalaciones de gasoductos.
- (b) Por tratarse de pozos aislados.
- (c) Por tratarse de un gas con contenido de sustancias inertes nocivas al consumo como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S.
- (d) Despilfarro del gas natural por el intento del aprovechamiento exclusivo del petróleo.

La práctica de la quema y venteo para eliminar los excedentes del gas natural es un desperdicio de una fuente de energía valiosa, y debido a la producción de CO<sub>2</sub> y las emisiones/perdidas de metano (CH<sub>4</sub>) al ambiente, contribuye al problema del calentamiento global (efecto de invernadero) y consecuentemente a los posibles

cambios climáticos. No obstante, la quema y el venteo también son medidas de seguridad importantes que son utilizadas en las instalaciones de petróleo y gas, para garantizar que el gas y otros hidrocarburos se eliminan de manera segura en caso de emergencia, fallo eléctrico de los equipos u otros problemas en las plantas.

En relación a la quema y venteo específicamente en el oriente venezolano, para Junio del 2009, alrededor del 8,5% de la producción de gas (523,1 MMPCD) está siendo quemada y/o venteadada a la atmósfera por no poseer la infraestructura suficiente para su manejo. En la Tabla N° 5 se muestra un balance de gas para el 2009 por cada área de la zona del oriente venezolano siendo el Distrito Norte del Estado Monagas el área del oriente que arroja mayor volumen de gas a la atmósfera.

**Tabla N° 5.** Balance de Gas por cada Área de la Zona de Oriente.

| <b>ÁREA</b>               | <b>ARROJADO A LA<br/>ATMÓSFERA<br/>(MMPCD)</b> | <b>% DE LA<br/>PRODUCCIÓN</b> |
|---------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>DTTO. NORTE</b>        | <b>207,8</b>                                   | 5,4                           |
| <b>LICENCIA QQ-GAS</b>    | 1,5                                            | 0,7                           |
| <b>PDVSA GAS ANACO</b>    | 8,1                                            | 0,7                           |
| <b>DTTO. SAN TOMÉ</b>     | 161,1                                          | 43,3                          |
| <b>PDVSA GAS SAN TOMÉ</b> | 22,2                                           | 55,6                          |
| <b>DIV. FAJA</b>          | 117,1                                          | 45,9                          |
| <b>DIV. COSTA AFUERA</b>  | 5,2                                            | 11,6                          |

**Fuente:** Cifras NO OFICIALES, 2009

## II.6 ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN

Los escenarios constituyen descripciones exploratorias y provisionales de un futuro probable. En él se pueden ver y comprender claramente los problemas, amenazas y oportunidades que tales circunstancias pueden presentar. No es una predicción o un pronóstico específico, es la descripción de eventos y tendencias que pueden ocurrir. La finalidad es entender la combinación de decisiones estratégicas que otorgarán un beneficio máximo, a pesar de las incertidumbres y desafíos del ambiente externo. Un escenario, además de *plausibilidad* debe tener *consistencia interna*, *utilidad* para la toma de decisiones y proveer la descripción de los *procesos causales*. (Firmenich, 2013).

Los escenarios se construyen a partir de conjeturas. Son enunciados hipotéticos y su función consiste en señalar un abanico de opciones y situaciones probables. Son hipótesis fundadas en diagnósticos de fuerzas que modelan los acontecimientos y su materia son los posibles encadenamientos de estas fuerzas, a los que se les puede asignar probabilidades (Firmenich, 2013). Proceden de visiones de la realidad, comprensivas, holísticas, agregadas. No le interesa determinar la fecha probable de un evento, sino los probables encadenamientos entre los mismos. Un escenario no tendrá lugar como se anticipa, pero sugiere una secuencia probable con el objeto de sensibilizar a quienes deben tomar decisión sobre lo que puede acontecer. Los escenarios son, por lo tanto, situaciones que no han sucedido todavía pero que tienen una cierta probabilidad de ocurrencia. La construcción de estos, sirve para profundizar el conocimiento del presente y sus tendencias, conforme a supuestos teóricos. Estos supuestos se pueden organizar en un modelo novedoso y ahorrativo.

Los escenarios pretenden establecer y controlar relaciones de incertidumbre, a fin de proponer ajustes y medidas de contingencia y se aseguran con la revisión periódica de los guiones propuestos. La construcción de escenarios no puede ser un ejercicio aislado.

## FASES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Para la construcción de escenarios se siguen las siguientes etapas:

1. Precisión del tema de estudio, espacio de escenario o campo de interés.
2. Identificación de las variables clave ó dimensiones que lo definen.
3. Constatación del grado de poder y conflictos entre actores sociales
4. Diseño de un escenario probable o “tendencial”.
5. Diseño de escenarios alternativos.

A los efectos de ordenar la secuencia de estos pasos a seguir para la construcción de escenarios, se puede sintetizar en tres fases: *preparación*, *desarrollo* y *utilización*. La fase de *preparación* incluye el análisis de la situación actual. En la fase de *desarrollo* se analizan los futuros posibles a través de distintas técnicas que incluyen la opinión de expertos y finalmente es en la fase de *utilización* donde se incluyen las recomendaciones.

### II.7 PUNTO DE EQUILIBRIO

El punto de equilibrio es el nivel de operación en el que la función de rentabilidad es nula ( $R=0$ ), es decir, donde los ingresos equilibran exactamente los costos. Es una técnica analítica que se utiliza para estudiar las relaciones entre costos, ingresos y beneficios.

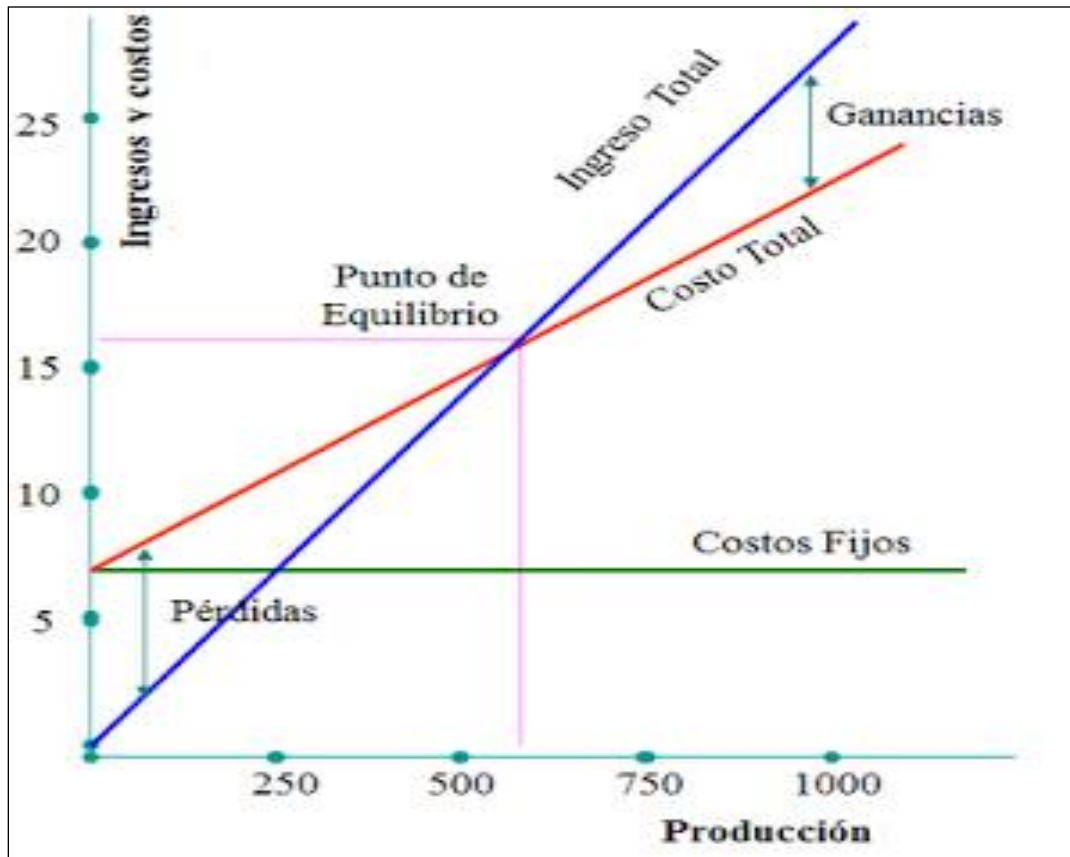
El análisis de punto de equilibrio tiene el propósito de determinar el valor de una variable o un parámetro de un proyecto o alternativa que iguala dos elementos, como por ejemplo, el volumen de ventas que iguala ingresos y costos. Un estudio de punto de equilibrio se lleva a cabo para dos alternativas con la finalidad de determinar

cuándo cualquiera de ellas es igualmente aceptable. El análisis de punto de equilibrio casi siempre se aplica en decisiones de hacer o comprar cuando las corporaciones y los negocios deben decidir respecto de la fuente de los elementos fabricados, servicios, etcétera (Blank, 2012).

El análisis de punto de equilibrio determina la vida mínima requerida de un activo, proceso o sistema para recuperar la inversión inicial. Los estudios de punto de equilibrio se valen de estimaciones que se consideran ciertas; es decir, si se espera que los valores estimados varíen lo bastante para que posiblemente influyan en el resultado, se requerirá otro análisis de punto de equilibrio con diferentes cálculos. Esto nos lleva a la observación de que el análisis de punto de punto de equilibrio forma parte del más amplio esquema del análisis de sensibilidad. Si se permite que varíe la variable de interés en un análisis de punto de equilibrio, es necesario adoptar los enfoques del análisis de sensibilidad. Además, si se toman en cuenta la probabilidad y evaluación con riesgo, se pueden aplicar las herramientas de simulación para complementar la naturaleza estática de un estudio de punto de equilibrio (Tarquin, 2012).

## **II.8 MÉTODO GRÁFICO DEL PUNTO DE EQUILIBRIO**

Si el costo total de producción excede a los ingresos obtenidos por las ventas de los objetos producidos, la empresa sufre una pérdida; si, por el contrario, los ingresos superan a los costos, se obtiene una utilidad o ganancia. Si los ingresos obtenidos por las ventas igualan a los costos de producción, se dice que el negocio está en el punto de equilibrio o de beneficio cero. En Figura N° 8 se muestra la gráfica del punto de equilibrio.



**Figura N° 8.** Punto de Equilibrio

**Fuente:** Planeamiento y Control de Operaciones / Principios y Técnicas

Carlos Romero Shollande

La gráfica de punto de equilibrio es un interesante método de control. Ella ilustra la relación entre las ventas y los gastos de manera que indica qué volumen de ingresos cubre en forma exacta los gastos. El punto de equilibrio también puede venir expresado en unidades de artículos vendidos, porcentaje usado de la planta o en términos similares.

- **Comportamiento de los ingresos**

Los ingresos totales en este tipo de análisis suelen comportarse como proporcionales al nivel de actividad. Habitualmente los ingresos suelen ser una función directa del precio de venta y de la cantidad de unidades vendidas.

$$\text{Ganancias} = \text{Precio (P)} \times \text{Cantidad (Q)}$$

Los ingresos totales suelen ser entonces una línea recta de pendiente positiva que pasa por el eje (0,0), y cuya pendiente es el precio de venta o ingreso unitario. Es fácil ver impacto de los cambios de las políticas de precios en este tipo de representaciones de los ingresos totales como función directa de los precios y las unidades, ya que un incremento o reducción de los precios de ventas se traduce en un aumento o disminución de la pendiente de esta recta de ingresos totales.

- **Comportamiento de los costos**

Los costos totales incluyen a los costos fijos como variables, y éstos pueden ser agregados y presentados en gráficas que reflejan el comportamiento de los costos en relación al nivel de actividad.

Los costos fijos serán independientes del nivel de actividad, mientras que los costos variables crecen de manera directa al volumen de unidades, siendo la pendiente de la curva de costos totales el costo variable unitario. Por lo que un aumento o disminución de los costos variables se traduce en un aumento o disminución de la pendiente de la curva de costos totales. Por el contrario, un incremento o reducción de los costos fijos se traduce en un desplazamiento en sentido vertical de la curva de costos totales.

En la parte izquierda la Figura N° 8 los costos totales son mayores a los ingresos totales “área deficitaria”. Cuando los ingresos alcanzan el punto en que se cubren todos los costos (fijos y variables) se dice que se está en el punto de equilibrio. Este

punto también se conoce como punto de quiebre o umbral de rentabilidad, dado que al cruzarlo se abandona el área deficitaria y se pasa al “área de beneficios”. El punto de equilibrio define cuando una inversión generará una rentabilidad positiva.

El gráfico del punto de equilibrio solamente tiene validez y es confiable dentro de un margen relativamente reducido, no sólo en cuanto a volúmenes de producción, sino también en lo referente al tiempo debido a lo siguiente:

- Se asume que el aumento de los costos siempre es lineal.
- No se considera el factor tiempo puesto que este afecta el punto de equilibrio.
- Dentro de ciertos márgenes, hay algunos costos variables que alteran su grado de variabilidad, y otros que incluso no llegan a variar. De todas formas, la determinación del punto de equilibrio de la empresa sirve de orientación a la gerencia para: establecer la meta de producción y ventas, determinar los costos unitarios a distintos niveles de producción, decidir la capacidad instalada de la planta, predecir las utilidades, medir el grado de eficiencia de la administración, evaluar la productividad y advertir deficiencias de la organización en general.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

En esta sección se presentan los pasos que se siguieron para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio del presente trabajo.

#### III.1 RECOPIACIÓN DE LA DATA

Con base al trabajo de García, Franklin (2011) y Medina, Fernando (2012), se determinó el marco teórico respecto al gas natural, usos, recolección y procesamiento del mismo. En el trabajo de maestría de Rodríguez, Karem (2010), se tomó todo lo relacionado a la quema y venteo del gas natural del oriente del país así como también información referente al balance de gas por cada área de la zona del oriente venezolano, descrito en la Tabla N° 5 presentada en el marco teórico. Respecto a la cantidad de gas venteado, resultados cromatográficos y condiciones del gas, fueron extraídos en base al trabajo de maestría de Azuaje, Nastenka (2010), los cuales pueden observarse a continuación en las Tablas N°6 y 7

**Tabla N° 6.** Condiciones del gas a utilizar

| <b>Flujo<br/>(Tmol/h)</b> | <b>Temperatura<br/>(°C)</b> | <b>Presión<br/>(Kpa)</b> | <b>Peso Molecular<br/>(gmol<sup>-1</sup>)</b> |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>1,847</b>              | <b>33,11</b>                | <b>3,44</b>              | <b>21,25</b>                                  |

**Fuente:** Nastenka, 2010

**Tabla N° 7.** Composición del gas a utilizar

| <b>Componente</b>                          |                       | <b>% Peso</b> | <b>%Molar</b> |
|--------------------------------------------|-----------------------|---------------|---------------|
| <b>H<sub>2</sub></b>                       | Hidrógeno             | 0             | 0             |
| <b>H<sub>2</sub>S</b>                      | Ácido Sulfúrico       | 0             | 0             |
| <b>CO<sub>2</sub></b>                      | Dióxido de Carbono    | 25,25         | 12,19         |
| <b>N<sub>2</sub></b>                       | Nitrógeno             | 0,97          | 0,74          |
| <b>C<sub>1</sub></b>                       | Metano                | 61,72         | 81,74         |
| <b>C<sub>2</sub></b>                       | Etano                 | 2,52          | 1,78          |
| <b>C<sub>3</sub></b>                       | Propano               | 3,48          | 1,68          |
| <b>iC<sub>4</sub></b>                      | i-Butano              | 1,32          | 0,48          |
| <b>nC<sub>4</sub></b>                      | n- Butano             | 1,76          | 0,65          |
| <b>iC<sub>5</sub></b>                      | i- Pentano            | 0,81          | 0,24          |
| <b>nC<sub>5</sub></b>                      | n-Pentano             | 0,35          | 0,10          |
| <b>C<sub>6</sub></b>                       | Hexano                | 0,46          | 0,12          |
| <b>C<sub>7</sub></b>                       | Heptano               | 0,54          | 0,13          |
| <b>C<sub>8</sub></b>                       | Octano                | 0,42          | 0,08          |
| <b>C<sub>9</sub></b>                       | Nonano                | 0,24          | 0,05          |
| <b>C<sub>10</sub></b>                      | Decano                | 0,16          | 0,02          |
| <b>C<sub>11</sub><sup>+</sup></b>          | Undecano <sup>+</sup> | 0             | 0             |
| <b>Totales:</b>                            |                       | <b>100</b>    | <b>100</b>    |
| <b>Nota: 0,00 significa menos de 0,005</b> |                       |               |               |

**Fuente:** Nastenka, 2010

En cuanto a la visualización de los escenarios de producción para el aprovechamiento del gas asociado destinado a la quema y/o venteo y valorización del mismo, fueron sustentados a través del trabajo de postgrado desarrollado por La Rosa, Lorena (2010) y Gragirena, Kharlys (20011). Finalmente del trabajo especial de grado de Álvarez, Sabrina (2013) y Carruido, Marifé (2013), fueron tomados los costos de inversión asociados a las plantas de tratamiento y separación de gases de quema y/o venteo, los cuales son presentados a continuación en la Tabla N° 8.

**Tabla N° 8.** Costos de las fases de tratamiento y separación de los gases de quema y/o venteo

| <b>PARA UNA CAPACIDAD DE 1,847 (Tmol/h)</b> |                              |                             |
|---------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| <b>TIPO DE PLANTA</b>                       | <b>PLANTA DE TRATAMIENTO</b> | <b>PLANTA DE SEPARACIÓN</b> |
| <b>COSTOS DE INVERSIÓN (MM\$)</b>           | 14,96                        | 10,08                       |

### **III.2 DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DEL PROCESO**

Para obtener el costo total se siguen los siguientes pasos:

1. Se estima el costo de las fases de tratamiento y separación de los gases de quema y/o venteo a través de la siguiente ecuación:

$$\text{CTS} = \text{Costo de tratamiento} + \text{Costo de Separación} \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde:

CTS = costo de tratamiento más separación (\$)

2. Una vez obtenido el costo de las fases de tratamiento y separación, se estima el costo de transporte de tal manera que:

$$\text{Costo de Transporte} = 0,15 * \text{CTS} \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde:

Costo de Transporte (\$)

3. Se calcula el costo total el cual se obtendrá de la suma del costo de transporte más el costo de las fases de tratamiento y separación a través de :

$$CT = \text{Costo de Transporte} + CTS \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde:

CT = costo total, (\$)

### III.3 ESTABLECIMIENTO DEL CASO BASE

El caso base estará conformado por un costo conocido (costo de inversión total del proceso) a una capacidad de gas conocida de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD), para luego utilizar la ecuación de predicción de costos la cual al variar las capacidades se obtendrán distintos costos, de tal manera que:

$$\text{Costo A} = \text{Costo B} \left( \frac{\text{Capacidad A}}{\text{Capacidad B}} \right)^n \quad (\text{Ec. 4}) \text{ (Blank, 2012)}$$

En donde:

Costo A= costo capacidad en estudio (requerida), (\$)

Costo B = costo capacidad conocida, (\$)

Capacidad A = capacidad en estudio (Tmol/h)

Capacidad B = capacidad conocida determinada a partir del caso base, (Tmol/h)

$n$  = factor de capacidad- costo, exponente de corrección que depende del tipo de planta. Usualmente (0,45-0,70), (adimensional).

El caso base, estará conformado también por los precios de los productos para venta internacional además de la cantidad obtenida por producto, estos valores se muestran en las Tablas N° 9 y 10 respectivamente.

**Tabla N° 9.** Precios de venta de los productos a nivel nacional

| <b>Componentes</b> | <b>Precios por tonelada (\$)</b> |
|--------------------|----------------------------------|
| <b>Etano</b>       | 660                              |
| <b>Propano</b>     | 790                              |
| <b>Butanos</b>     | 835                              |

**Fuente:** Álvarez, 2013

**Tabla 10.** Cantidad obtenida por producto a nivel nacional

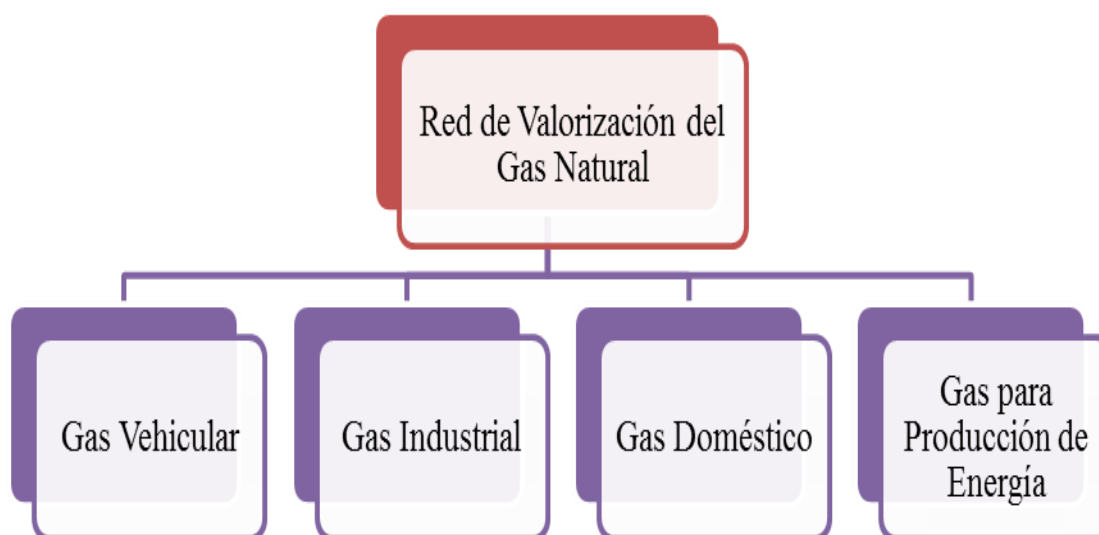
| <b>Componentes</b> | <b>Toneladas por año (Ton/año)</b> |
|--------------------|------------------------------------|
| <b>Metano</b>      | 245.116,80                         |
| <b>Etano</b>       | 8.449,92                           |
| <b>Propano</b>     | 13.098,24                          |
| <b>Butano</b>      | 11.888,64                          |

**Fuente:** Álvarez, 2013

A partir del caso base, se realizaron las perspectivas económicas para cada uno de los fines, con el objetivo de construir las gráficas de rentabilidad en función de la capacidad de planta.

### III.4 ELABORACIÓN DEL ESQUEMA DEL SISTEMA DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL

Con el fin de conocer el precio de venta de cada una de las etapas que conforman la red o sistema de valorización del gas natural, se realizó un esquema el cual permite visualizar las mismas, con el propósito de cumplir con el primer objetivo específico planteado en este Trabajo Especial de Grado. En la figura N° 9 se presentan las etapas que conforman la red de valorización del gas natural.



**Figura N° 9.** Red de Valorización del Gas Natural

Según las fuentes bibliográficas consultadas y a través del ministerio de energía y minas DOME GAS, se tomaron los precios de venta nacionales e internacionales de cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural. En la Tabla N° 11 se muestran los precios del gas metano según el tipo de consumidor.

**Tabla N° 11.** Precios de venta del gas metano a nivel nacional e internacional.

| <b>Etapas que conforman la Red de Valorización del GN</b> | <b>Precio de venta nacional (\$/Ton)</b> | <b>Precio de venta internacional (\$/Ton)</b> |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Gas para uso vehicular</b>                             | 0,24                                     | 2,98                                          |
| <b>Gas para uso industrial</b>                            | 3,32                                     | 38,50                                         |
| <b>Gas para uso doméstico</b>                             | 6,64                                     | 20,00                                         |
| <b>Gas para energía</b>                                   | 0,34                                     | 14,60                                         |

Al conocer los precios de venta de cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural, se determinó la ganancia de cada una y a su vez la rentabilidad tanto a nivel nacional como internacional.

### **III.5 DETERMINACIÓN DE LA GANANCIA PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL**

Para calcular la rentabilidad primero se determinó la ganancia (ingreso por venta), la cual viene dada básicamente por el precio de venta de cada una de las etapas que conforman el sistema de valorización del gas natural que en esencia es gas metano, precio de venta de subproductos de alto valor agregado como el etano, propano y butanos y por la cantidad obtenida de cada subproducto, de tal manera que:

$$G = (P1 * C1) + (P2 * C2) + (P3 * C3) + (P4 * C4) \quad (\text{Ec. 5}) \quad (\text{Blank, 2012})$$

En donde:

$G$  = ganancia, (\$)

$P1$  = precio de venta de c/u de la etapas que conforman el sistema de valorización del gas natural, (\$/Ton).

$P2$  = precio de venta del etano, (\$/Ton).

$P3$  = precio de venta del propano, (\$/Ton).

$P4$  = precio de venta de butanos, (\$/Ton).

$C1$  = cantidad obtenida de metano, (Ton/año).

$C2$  = cantidad obtenida de etano, (Ton/año).

$C3$  = cantidad obtenida de propano, (Ton/año).

$C4$  = cantidad obtenida de butanos, (Ton/año).

Al determinar la ganancia de los productos se pudo calcular la rentabilidad para cada etapa.

### **III.6 DETERMINACIÓN DE LA RENTABILIDAD PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL**

Con la ganancia calculada en el paso III.5 y el costo total calculado en el paso III.2, se procedió a calcular la rentabilidad de la siguiente manera:

$$R = G - CT \quad (\text{Ec. 6}) \quad (\text{Blank, 2012})$$

En donde:

$R$  = rentabilidad, (\$)

Al calcular la rentabilidad, el caso base y la ecuación de predicción de costos, fue posible construir las gráficas de rentabilidad en función de la capacidad de planta para cada uno de los fines.

### **III.7 ESTABLECIMIENTO DE LOS ESCENARIOS DE PRODUCCIÓN**

Desde hace varios años el gobierno venezolano ha mantenido fijos, por vía decreto, los precios de la mayoría de los servicios públicos. Esto, en vez de beneficiar a los usuarios, termina perjudicándolos debido a que el constante incremento en los costos de producción, obliga a los productores y prestadores de estos servicios a reducir, e incluso paralizar su producción, lo que afecta directamente al consumidor. Las consecuencias de esta política de control de precios, conlleva a frecuentes pérdidas para las empresas y para el estado, quien debe asumir mediante subsidio las pérdidas, así mismo, esta política genera importantes distorsiones en el consumo. Los sectores cuyos precios regulados han ocasionado mayores distorsiones en el consumo son: la gasolina, la electricidad y el gas natural.

Debido a esta problemática, se establecen dos escenarios de producción en los cuales se comprueban que al manejar los precios regulados en Venezuela, las pérdidas en cuanto a operatividad se refiere son constantes, más sin embargo, al utilizar los precios a nivel internacional lo que se obtienen son ganancias, por tanto, los escenarios de producción a considerar en este trabajo especial de grado son los siguientes:

- **ESCENARIO 1:** precios del gas regulados y energía regulada en Venezuela.
- **ESCENARIO 2:** precios del gas a nivel internacional y energía regulada en Venezuela.

### **III.8 EVALUACIÓN DE LOS CASOS**

El objetivo de esta etapa una vez construidas todas las gráficas capacidad de planta en función de la rentabilidad para los distintos escenarios, es evaluar cada uno de los casos con el propósito de obtener cuál de ellos genera el mejor beneficio para el uso del gas natural. Se identificará en las gráficas el punto de equilibrio en el cual se empieza a obtener beneficios.

### **III.9 COMPARACIÓN ENTRE LOS CASOS**

La finalidad de este paso es comparar en cada caso, si el proceso es rentable según el punto de equilibrio obtenido para cada uno de los fines a nivel nacional e internacional.

### **III.10 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

La data que se recopiló, se analizó según referencias bibliográficas

### **III.11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Del análisis y discusión de los resultados obtenidos, después de ejecutar todo el procedimiento metodológico descrito, surgirán las conclusiones y recomendaciones correspondientes al presente Trabajo Especial de Grado.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En esta sección se presentan cada uno de los resultados obtenidos, para el cumplimiento de los objetivos en el inicio del Trabajo Especial de Grado.

#### **IV.1 DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL DEL PROCESO**

Con la finalidad de determinar la rentabilidad, se calculó el costo total del proceso, para obtenerlo se estimó el costo de inversión asociado a las fases de tratamiento y separación de los gases de quema y/o venteo mediante la ecuación 1 descrita en la metodología en el paso III.2, en donde:

Para una capacidad de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD), se tiene que:

$$\textbf{CTS = Costo de Tratamiento + Costo de Separación}$$

$$\textbf{CTS = 14.960.900 + 10.080.560 = 25.041.460 \$}$$

$$\textbf{CTS = 25,04 MM\$}$$

A partir del costo de inversión de las fases de tratamiento y separación de los gases de quema y/o venteo se calculó el costo de transporte a través de la ecuación 2 puntualizada en la metodología, en donde:

$$\textbf{Costo de Transporte = 0,15 * CTS}$$

$$\textbf{Costo de Transporte = 0,15 * 25.041.460 = 3.756.219 \$}$$

$$\textbf{Costo de Transporte = 3,76 MM\$}$$

Finalmente al calcular el costo de transporte y el costo de inversión asociado a las fases de tratamiento más separación se determinó el costo total del proceso, el cual viene representado por la ecuación 3 descrita en la metodología de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{CT} &= \text{Costo de Transporte} + \text{CTS} \\ \text{CT} &= 3.756.219 + 25.041.460 = 28.797.679 \$ \\ \text{CT} &= 28,80 \text{ MM\$} \end{aligned}$$

## IV.2 CASO BASE

Con el objetivo de construir las gráficas de rentabilidad en función de la capacidad de planta, se utilizó el siguiente caso base, mostrado a continuación en la Tabla N° 12.

**Tabla N° 12. Caso Base**

|                                                           |                                 |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Capacidad máxima de gas a tratar</b>                   | <b>1,847(Tmol/h) = 35 MMPCD</b> |
| <b>Costo Total (MM\$)</b>                                 | 28.80                           |
| <b>Precios de venta de los productos a nivel nacional</b> | Tabla N° 9                      |
| <b>Cantidad obtenidas por producto a nivel nacional</b>   | Tabla N° 10                     |

### IV.3 CÁLCULO DE LA GANANCIA PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL NACIONAL

Para calcular la rentabilidad, se determinó la ganancia que genera cada una de las etapas a través de la Ecuación N° 5, en donde:

Para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h, la ganancia para gas vehicular a nivel nacional es:

$$G(\$) = (P1 * C1) + (P2 * C2) + (P3 * C3) + (P4 * C4)$$

$$G = (0,24 * 245.116,8) + (660 * 8.449,92) + (790 * 13.098,24) + (835 * 11.888,64)$$

$$G = 25.909.519 \$$$

En la Tabla N° 13 se presentan las ganancias obtenidas a nivel nacional por cada etapa que conforma la red de valorización del gas natural para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD).

**Tabla N° 13.** Ganancia obtenida en cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h.

| ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GN | GANANCIA DE CADA ETAPA A NIVEL NACIONAL (MM\$) |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Gas para uso Vehicular                             | 25,91                                          |
| Gas para uso Industrial                            | 26,66                                          |
| Gas para uso Doméstico                             | 27,48                                          |
| Gas para Producción de Energía                     | 25,94                                          |

#### **IV.4 CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL NACIONAL**

Al determinar la ganancia se calculó la rentabilidad en cada etapa a nivel nacional, en donde:

Para una capacidad máxima de gas a procesar de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD), la rentabilidad para gas vehicular a nivel nacional es:

$$R = G - CT$$

$$R = 25,91 - 28,80$$

$$R = -2,89 \text{ MM\$}$$

En la tabla N° 14 se presentan las rentabilidades obtenidas a nivel nacional por cada etapa que conforma la red de valorización del gas natural para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD).

**Tabla N° 14.** Rentabilidad obtenida en cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h.

| <b>ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL</b> | <b>RENTABILIDAD A NIVEL NACIONAL (MM\$)</b> |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Gas para uso vehicular</b>                                      | -2,89                                       |
| <b>Gas para uso industrial</b>                                     | -2,13                                       |
| <b>Gas para uso doméstico</b>                                      | -1,32                                       |
| <b>Gas para producción de energía</b>                              | -2,86                                       |

Como se puede observar en la Tabla N° 14, con los precios que manejan actualmente para los distintos usos del gas metano, las rentabilidades son negativas en cualquiera que sea el caso, esto significa que el proceso lo que genera son pérdidas.

#### IV.5 CÁLCULO DE LA GANANCIA PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL INTERNACIONAL

Al tomar en cuenta los precios de los productos a nivel internacional, es posible hallar la rentabilidad para cada etapa, para ello, en la Tabla N° 15 se presentan los precios de los productos a nivel internacional.

**Tabla N° 15.** Precio de venta de los productos a nivel internacional

| <b>Componentes</b> | <b>Precio por tonelada (\$)</b> |
|--------------------|---------------------------------|
| <b>Etano</b>       | 600                             |
| <b>Propano</b>     | 380                             |
| <b>Butanos</b>     | 1691                            |

Al calcular la ganancia para cada etapa que conforma la red de valorización del gas natural a nivel internacional para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) manteniendo la cantidad obtenida por producto a nivel nacional mostrada en la Tabla N° 10 y considerando los precios de la Tabla N° 15, se tiene que:

Para gas vehicular a nivel internacional, la ganancia es:

$$G(\$) = (P1 * C1) + (P2 * C2) + (P3 * C3) + (P4 * C4)$$

$$G = (2,98 * 245.116,8) + (600 * 8.449,92) + (380 * 13.098,24) + (1691 * 11.888,64)$$

$$G= 30.880.518 \$$$

En la Tabla N° 16 se presentan las ganancias obtenidas a nivel internacional para cada etapa que conforma la red de valorización del gas natural.

**Tabla N° 16.** Ganancia obtenida en cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel internacional para una capacidad de 1,847 Tmol/h

| <b>ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GN</b> | <b>GANANCIA DE CADA ETAPA A NIVEL INTERNACIONAL (MM\$)</b> |
|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Gas para uso Vehicular</b>                             | 30,88                                                      |
| <b>Gas para uso Industrial</b>                            | 39,58                                                      |
| <b>Gas para uso Doméstico</b>                             | 35,03                                                      |
| <b>Gas para Producción de Energía</b>                     | 33,73                                                      |

#### **IV.6 CÁLCULO DE LA RENTABILIDAD PARA CADA UNA DE LAS ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL INTERNACIONAL**

A partir de las ganancias obtenidas mostradas en la Tabla N° 16, se calculó la rentabilidad a nivel internacional para cada una de las etapas, en donde:

Para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h, la rentabilidad para gas vehicular a nivel internacional es:

$$R = G - CT$$

$$R = 30,88 - 28,80$$

$$R = 2,08 \text{ MM\$}$$

En la Tabla N° 17 se presentan las rentabilidades obtenidas a nivel internacional para cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural.

**Tabla N° 17.** Rentabilidad obtenida en cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel internacional para una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h

| <b>ETAPAS QUE CONFORMAN LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL</b> | <b>RENTABILIDAD A NIVEL INTERNACIONAL (MM\$)</b> |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>Gas para uso vehicular</b>                                      | 2,08                                             |
| <b>Gas para uso industrial</b>                                     | 10,79                                            |
| <b>Gas para uso doméstico</b>                                      | 6,23                                             |
| <b>Gas para producción de energía</b>                              | 4,93                                             |

En la Tabla N° 17 se puede observar que al tomar los precios a nivel internacional, las rentabilidades son positivas en todos los casos por lo que se obtienen ganancias del proceso.

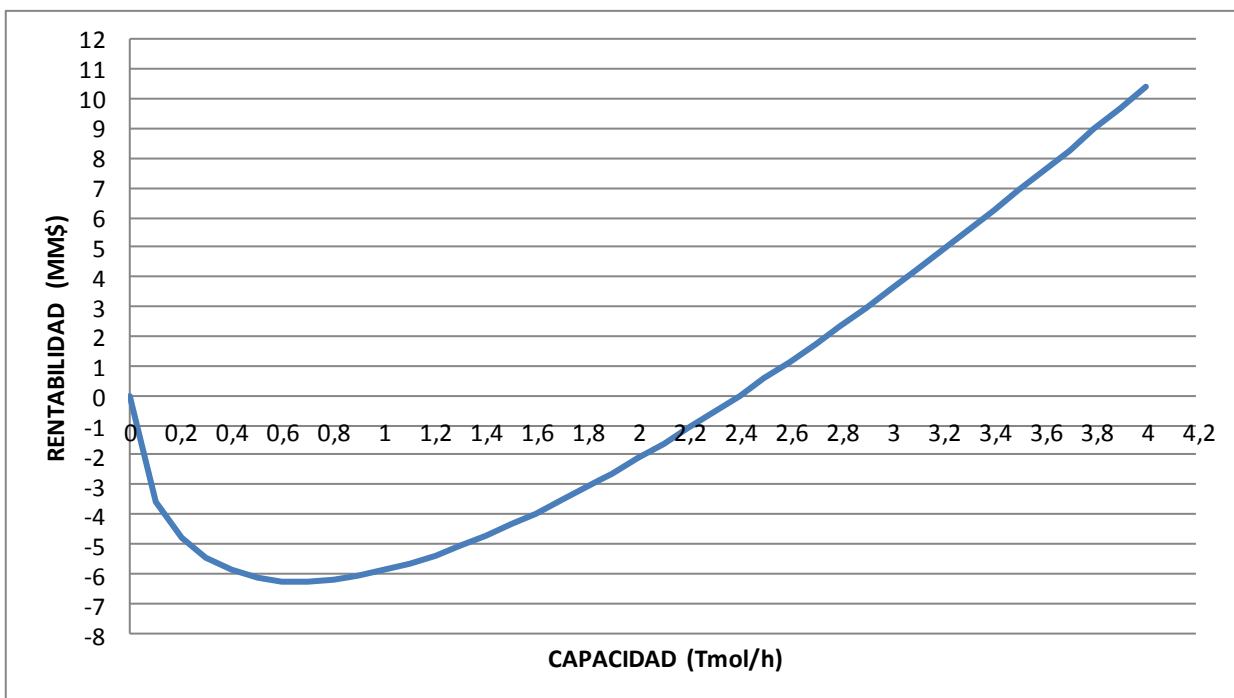
#### **IV.7 EVALUACIÓN DE LOS CASOS**

Para cumplir con el objetivo de este paso, se utilizó la ecuación de predicción de costos (Ecuación N° 4), esta ecuación permitió obtener diferentes valores de costos totales al variar capacidades menores a 1,847 Tmol/h para luego determinar las rentabilidades y así construir las gráficas de rentabilidad en función de la capacidad de planta para los distintos escenarios.

#### IV.7.1 ESCENARIO DE PRODUCCIÓN N°1

El escenario 1, comprende los precios del gas regulados en Venezuela, al construir las gráficas de rentabilidad en función de la capacidad de planta para cada etapa que conforma la red de valorización del gas natural bajo este escenario de producción se tiene que:

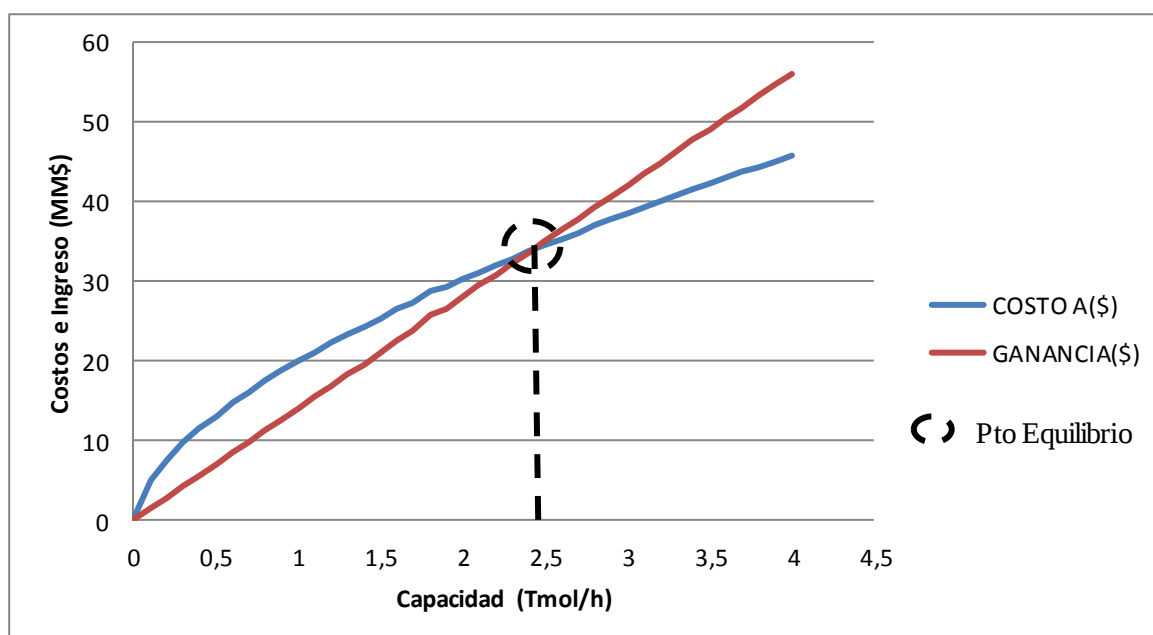
Al utilizar los datos de la Tabla N° 28 descrita en el Anexo 1, para gas vehicular a nivel nacional, la gráfica obtenida es la siguiente:



**Figura N° 10.** Curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas vehicular a nivel nacional.

La figura N° 10 representa la rentabilidad en función de la capacidad de planta para el gas vehicular a nivel nacional con un crecimiento exponencial progresivo, en ella se puede observar que para capacidades entre 0 y 2,2 Tmol/h (0-41,8 MMPCD) las rentabilidades son negativas, a partir del punto de inflexión de la curva se pudiera intuir que las pérdidas empiezan a minimizarse debido a que la curva va aumentando al aumentar la capacidades pero esto no es garantía de que el proceso sea eficazmente

rentable, sin embargo, para el caso de estudio la capacidad máxima a procesar es de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD, caso base) en este punto la rentabilidad todavía se mantiene negativa. El proceso comienza a ser rentable a partir de una capacidad de 2,4 Tmol/h (45,5 MMPCD) en donde las rentabilidades se mantienen positivas al ir aumentando las capacidades de gas. Al prolongar la curva para capacidades mayores a 1,8 Tmol/h (35 MMPCD) se puede observar que para obtener rentabilidad del proceso con los precios nacionales regulados, se necesitaría casi el doble de la capacidad. Para sustentar el análisis de rentabilidad se determinó gráficamente el punto de equilibrio de la curva a partir de la Tabla N° 36 situada en el Anexo 2, el cual está representado en la Figura N° 11.

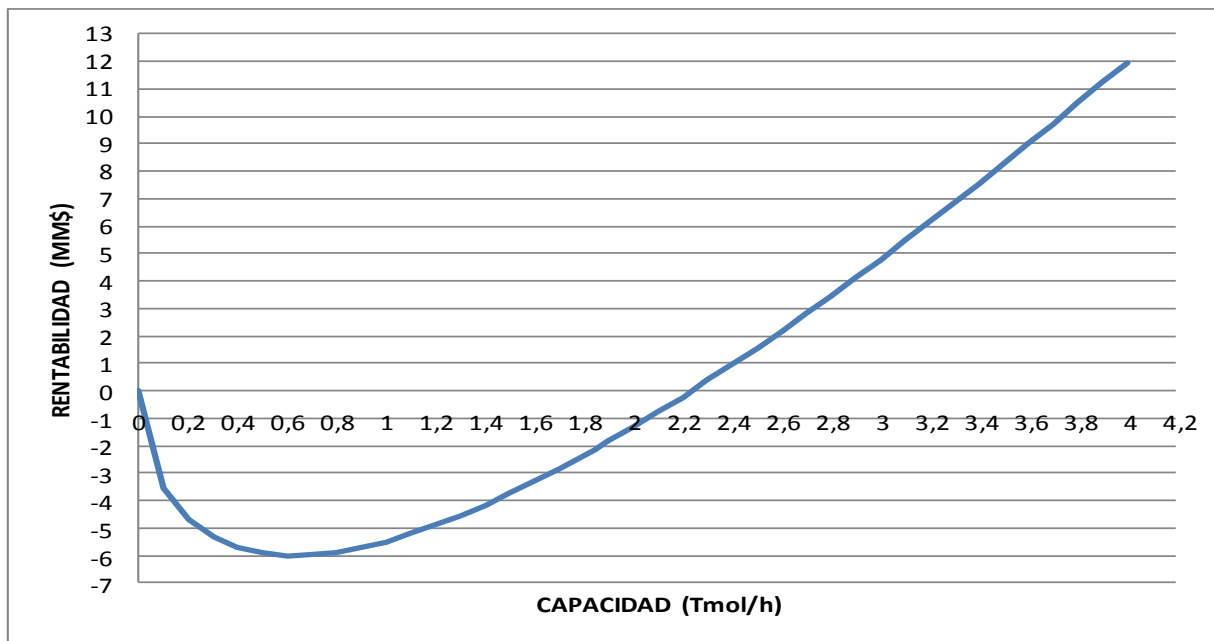


**Figura N° 11.** Punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas vehicular a nivel nacional.

El enfoque del análisis de punto de equilibrio suele servir para tomar decisiones de fabricar, procesar o comprar. Esto significa decidir entre firmar un contrato para comprar el producto o servicio a un proveedor externo, o fabricarlo dentro de la empresa. Por lo general, la alternativa de comprar no tiene costo fijo y sí un costo mayor variable respecto de la opción de fabricar. Para este caso, el punto donde se

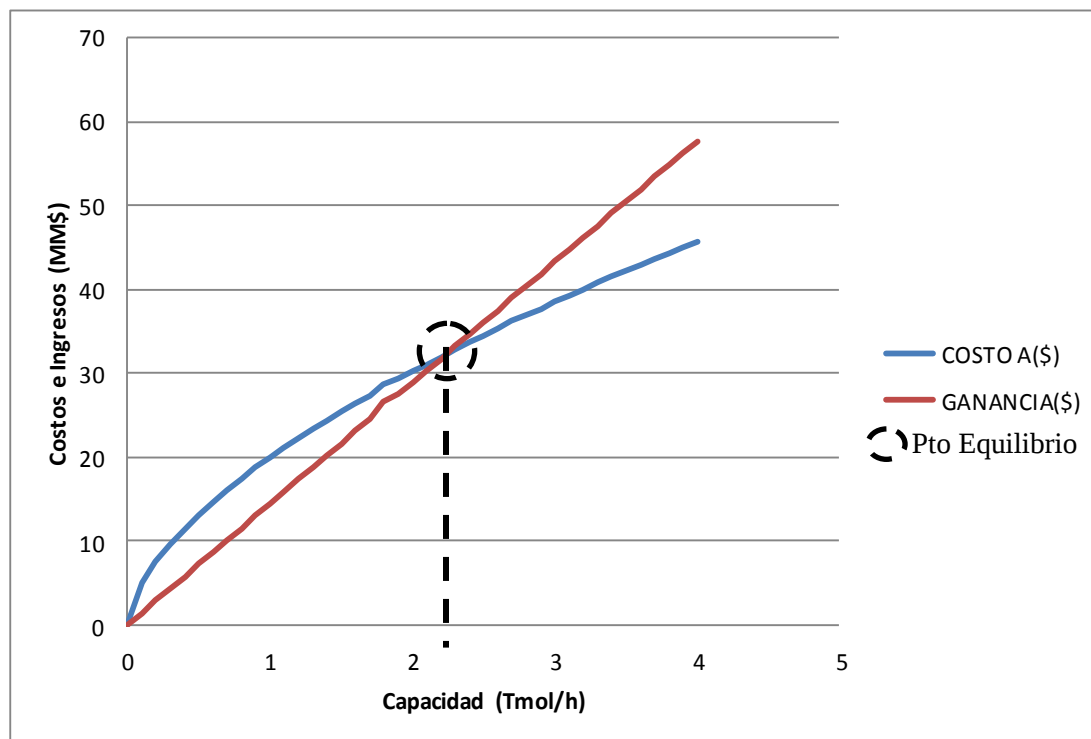
cruzan las dos relaciones de costo se encuentra la cantidad para decidir si es rentable o no el procesar una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD). En base a esto, en la Figura N° 11 se expresa las relaciones entre la capacidad, los costos e ingresos por medio de una gráfica de costo-capacidad-ganancia. El punto de equilibrio obtenido se ubica en 2,5 Tmol/h (47,4 MMPCD), es decir, que a partir de capacidades menores a 2,5 Tmol/h (47,4 MMPCD) se obtienen pérdidas por lo que no es rentable operar a esas capacidades tan bajas debido a que no se obtienen ganancias, sin embargo a capacidades mayores de 2,5 Tmol/h (47,4 MMPCD) es cuando se comienza a obtener utilidades (utilidad bruta). Por lo tanto la decisión de procesar una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) a precios regulados en Venezuela no es viable ya que se estaría invirtiendo una cantidad de dinero sin obtener beneficios.

Para el caso del gas metano para uso industrial, la gráfica obtenida a partir de la Tabla N° 30 puntualizada en el Anexo 1 es la siguiente:



**Figura N° 12.** Curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas industrial a nivel nacional.

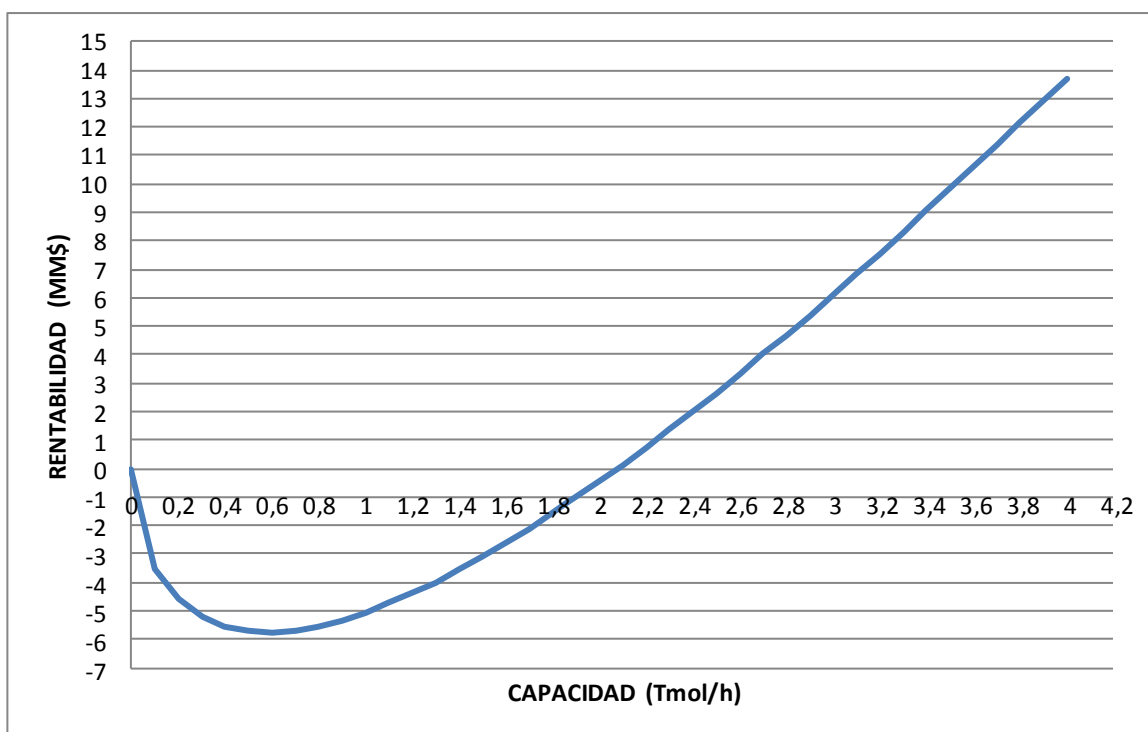
En la Figura N° 12 se representa la rentabilidad en función de la capacidad de planta para el gas industrial a nivel nacional, al igual que el caso anterior la curva presenta un crecimiento exponencial. En esta figura se observa que para capacidades entre 0 y 2 Tmol/h (0-38 MMPCD), las rentabilidades son negativas, a partir del punto de inflexión situado entre 0,6 y 0,7 Tmol/h (11,4-13,3 MMPCD), la curva empieza a hacerse positiva al ir aumentando las capacidades, pudiéndose decir que a partir de este, las pérdidas podrían minimizarse. Ahora bien, como es sabido la capacidad máxima de interés a procesar es de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD), para la gráfica en estudio, este punto presenta rentabilidades negativas por lo cual el proceso no es rentable. A partir de una capacidad de 2,2 Tmol/h (41,8 MMPCD) es cuando comienza a existir rentabilidad ya que estas se mantienen positivas a medida en que se incrementan las capacidades. Para corroborar el análisis de rentabilidad, de igual forma se graficó el punto de equilibrio de la curva a partir de la Tabla N° 37 ubicada en la sección de anexos, el cual está representado gráficamente en la Figura N° 13.



**Figura N° 13.** Punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas industrial a nivel nacional

La Figura N° 13 representa la relación que existe entre el costo, la ganancia y la capacidad en donde el punto de equilibrio se ubica en 2,2 Tmol/h (41,8 MMPCD), a partir de este punto, se observa en la gráfica un área deficitaria en la cual el proceso no es rentable debido a que no se obtienen beneficios, sin embargo, al cruzar el punto de equilibrio es cuando se comienza a obtener utilidades del proceso, por lo tanto al igual que el caso anterior la decisión de procesar un flujo máximo de gas metano a 1,8 Tmol/h (35 MMPCD) para uso industrial no es viable debido a que este punto se encuentra por debajo del punto de equilibrio y no se obtienen ganancias.

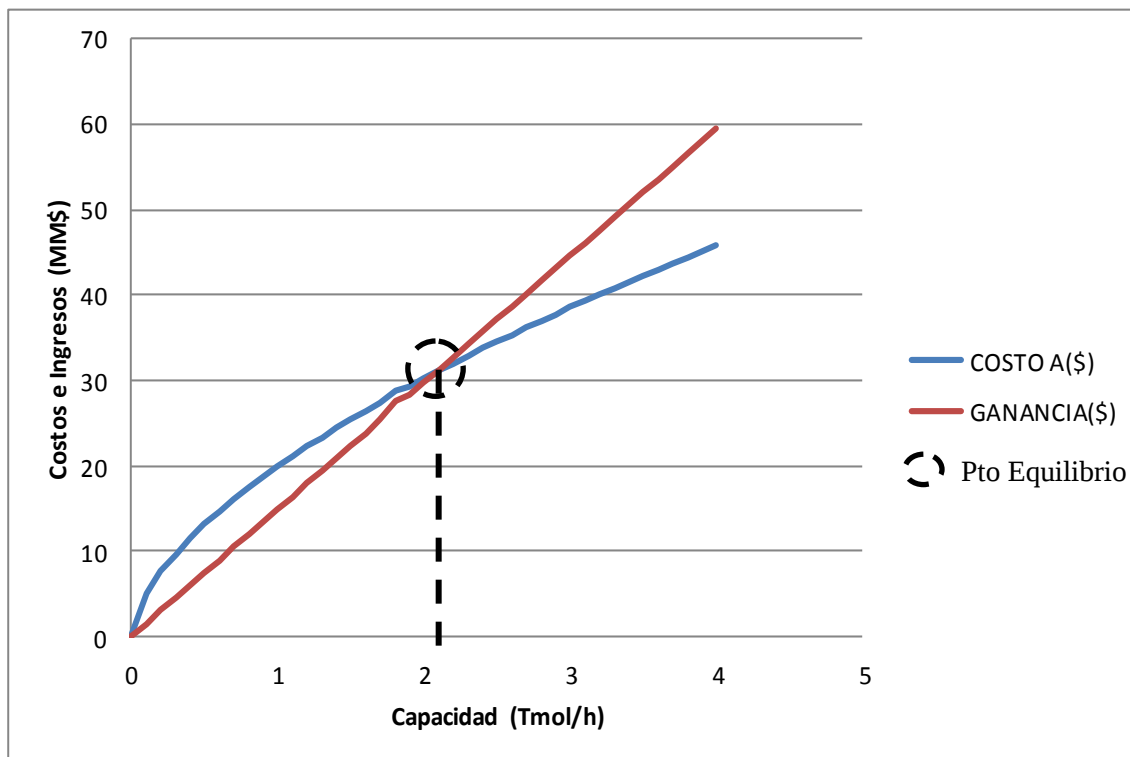
Al evaluar el caso del gas metano para uso doméstico, la gráfica obtenida a partir de la Tabla N° 32 descrita en el Anexo 1 es la siguiente:



**Figura N° 14.** Curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas doméstico a nivel nacional

La Figura N° 14 representa la curva de rentabilidad en función de la capacidad para el gas doméstico a nivel nacional, para este caso, la curva continúa presentando un crecimiento progresivo exponencial. En esta figura se observa que las rentabilidades son negativas para capacidades entre 0 y 1,8 Tmol/h (0-35 MMPCD), a partir del

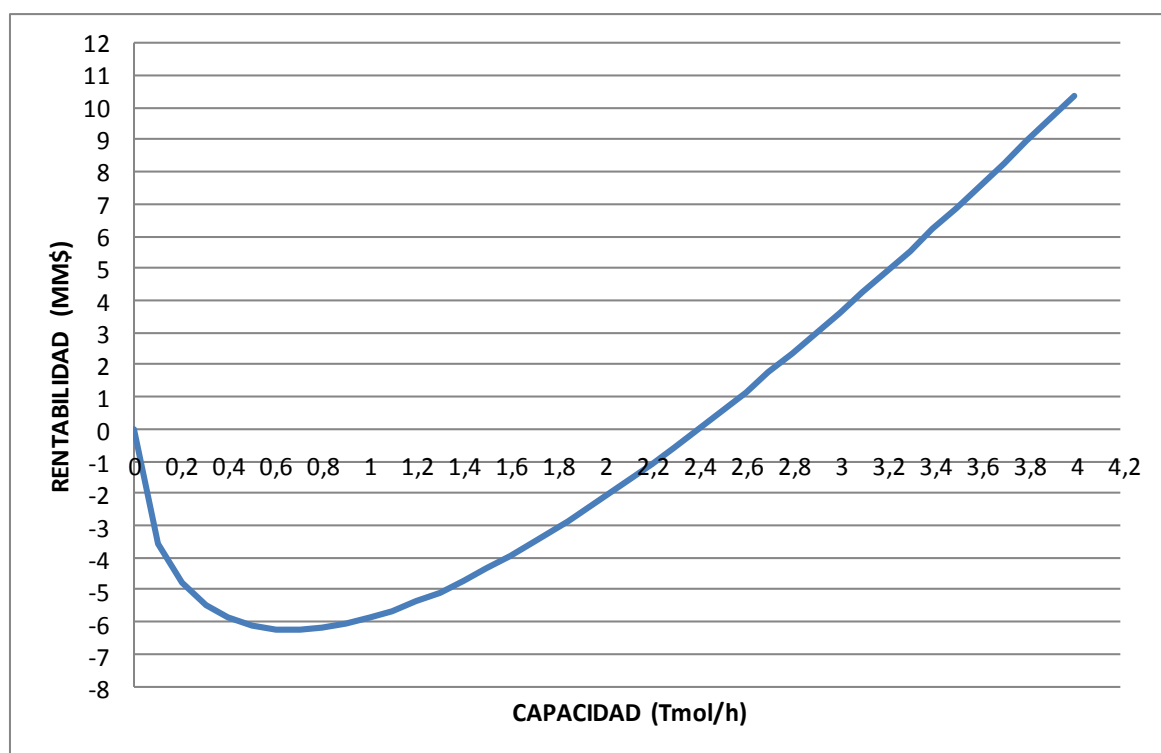
punto de inflexión situado en 0,6 Tmol/h (11,4 MMPCD) la curva empieza a tener un comportamiento positivo a medida en que aumentan las capacidades, concluyendo que a partir de éste las pérdidas se empiezan a disminuir. Si bien es cierto que la capacidad máxima de interés a procesar es de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD), para la gráfica en estudio, en este punto la rentabilidad todavía se mantiene negativa por lo que el proceso no es beneficioso, este comienza a ser productivo a partir de una capacidad de 2,1 Tmol/h (40 MMPCD) en donde las rentabilidades se mantienen positivas a medida en que se incrementan las capacidades. Para obtener ganancias del proceso en cuestión se necesitan capacidades mayores a 1,8 Tmol/h (35 MMPCD). Este análisis se sustenta a través del método gráfico del punto de equilibrio de la curva, el cual está representado en la Figura N° 15 y fue determinado a partir de la Tabla N° 38 ubicada en el Anexo 2.



**Figura N° 15.** Punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas doméstico a nivel nacional

La Figura N° 15 representa gráficamente la relación entre la capacidad, los costos e ingresos por medio de una gráfica de costo-capacidad ganancia, en donde el punto de equilibrio obtenido se sitúa alrededor de 2,1 Tmol/h (40 MMPCD), por lo que a partir de este punto, a capacidades menores se obtienen pérdidas y a capacidades mayores es cuando el proceso resulta económicamente rentable y se obtienen beneficios, esto verifica, que no es viable procesar un flujo máximo de gas de 1,8 Tmol/h (35 MMPCD) para uso doméstico ya que al procesarlo no se obtienen utilidades.

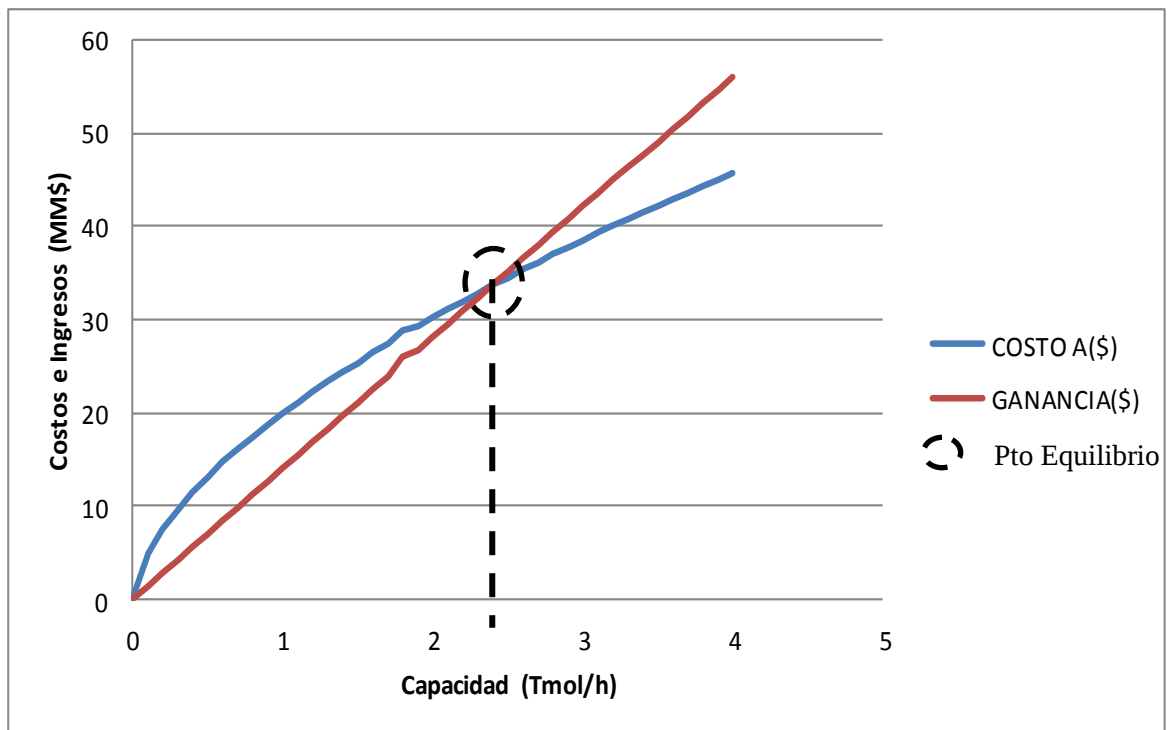
Para el caso del gas metano para producción de energía al utilizar la Tabla N° 34 de la sección de Anexos, la gráfica obtenida es la siguiente:



**Figura N° 16.** Curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel nacional

La figura N° 16 representa la rentabilidad en función de la capacidad de planta del gas para producción de energía, al igual que en los casos anteriores, esta presenta un comportamiento exponencial en la cual las rentabilidades son negativas para capacidades entre 0 y 2,2 Tmol/h (0-41,8 MMPCD), las pérdidas comienzan a

disminuir a partir del punto de inflexión ubicado alrededor de 0,7 Tmol/h (13,3 MMPCD) ya que la curva va aumentando progresivamente al ir aumentando las capacidades, pero esto no es garantía de que el proceso sea o no rentable. La capacidad máxima de gas a procesar es de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD), en este punto la rentabilidad es negativa por lo que no es favorable operar a esta capacidad. El proceso comienza a ser provechoso a partir de capacidades mayores a de 2,4 Tmol/h (45,5 MMPCD) en donde las rentabilidades se mantienen positivas a medida que van aumentando las capacidades. Para sustentar el análisis de rentabilidad a partir de la Tabla N° 39 descrita en el Anexo 2, se determinó el punto de equilibrio de la curva el cual está representado gráficamente en la Figura N° 17.



**Figura N° 17.** Punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel nacional.

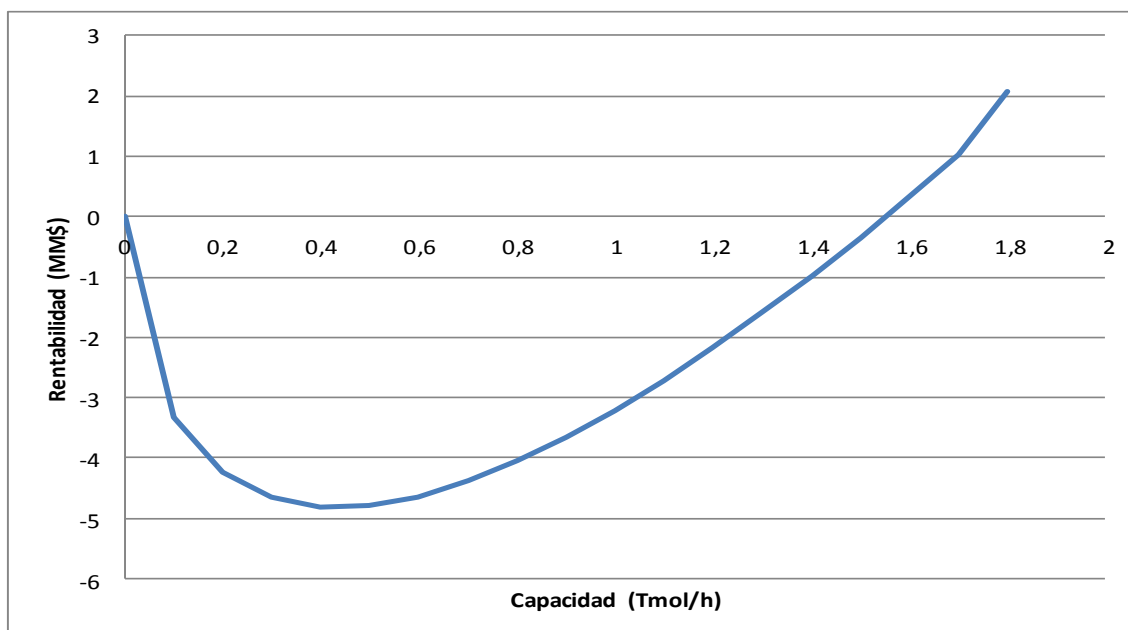
En la Figura N° 17 se observa que el punto de equilibrio obtenido se ubica alrededor de 2,4 Tmol/h (45,5 MMPCD) por lo que a partir de este punto a capacidades menores el proceso no es rentable ya que no se obtienen ganancias. En la figura se

observa un área de beneficios a partir de capacidades mayores al punto de equilibrio, en esta área se obtienen utilidades, esto verifica que procesar un flujo máximo de gas de 1,8 Tmol/h (35 MMPCD) para producir energía a precios regulados en Venezuela, no es viable ya que esta capacidad se encuentra por debajo del punto de quiebre y por consiguiente no se obtienen dividendos.

#### IV.7.2 ESCENARIO N° 2

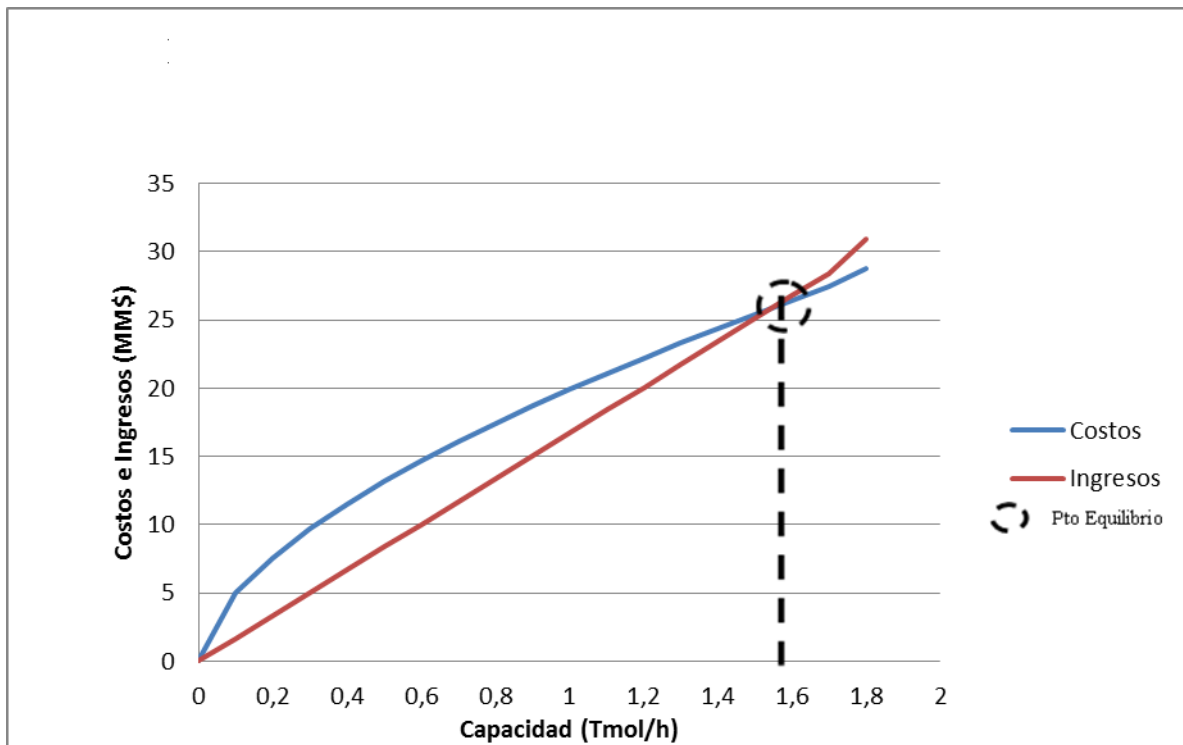
El escenario 2, comprende los precios del gas a nivel internacional pero manteniendo la cantidad que se obtiene por producto a nivel nacional. Al construir las gráficas de rentabilidad en función de la capacidad para cada etapa que conforma la red de valorización del gas natural bajo este escenario de producción se tiene que:

Al utilizar la Tabla N° 29 de la sección de anexos, la gráfica obtenida para el caso del gas metano para uso vehicular es la siguiente:



**Figura N° 18.** Curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas vehicular a nivel internacional

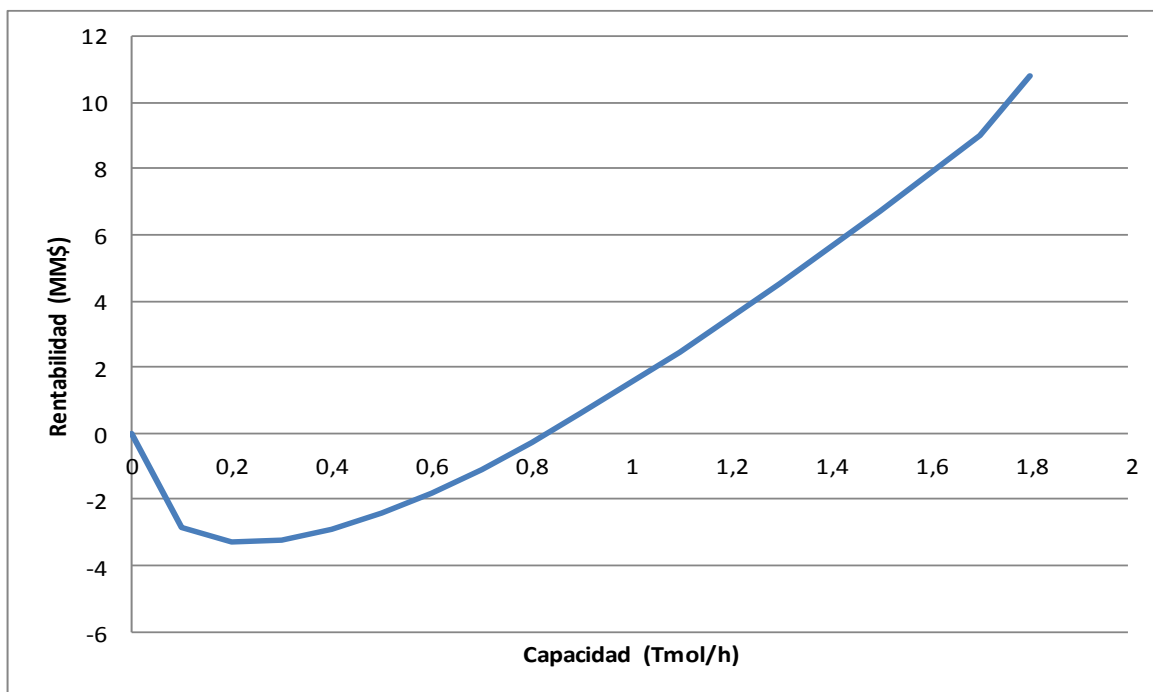
La Figura N° 18 representa la curva de rentabilidad en función de la capacidad para el gas vehicular a nivel internacional con un crecimiento ascendente, en ella se observa que para capacidades de planta entre 0 y 1,55 Tmol/h (0-20 MMPCD) aproximadamente las rentabilidades son negativas. El punto de inflexión de la curva ubicado en 0,4 Tmol/h (7,6 MMPCD) refleja que las pérdidas disminuyen a medida en que la curva va aumentando progresivamente al ir aumentando las capacidades. A partir de capacidades mayores a 1,55 Tmol/h (20 MMPCD), las rentabilidades se vuelven positivas al incrementarse las capacidades. Para saber cuándo se obtienen beneficios del proceso en cuestión, se determinó de forma gráfica el punto de equilibrio a través de los datos de la Tabla N° 40 ubicada en la sección de Anexos, este se puede apreciar en la Figura N° 19.



**Figura N° 19.** Punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas vehicular a nivel internacional.

Las relaciones entre la capacidad, los costos e ingresos se expresan gráficamente en la Figura N° 19. El punto de equilibrio en donde los ingresos equilibran exactamente los costos está situado para una capacidad de 1,6 Tmol/h (30,2 MMPCD) en el cual a partir de capacidades menores a este el proceso no es viable debido a que se obtienen pérdidas, sin embargo a capacidades mayores del punto de equilibrio es cuando se obtienen beneficios del proceso, en relación al caso de estudio, el objetivo es decidir si el proceso es rentable operando a una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD), efectivamente resulta económicamente rentable ya que esta capacidad se encuentra por encima del punto de equilibrio obteniéndose ganancias.

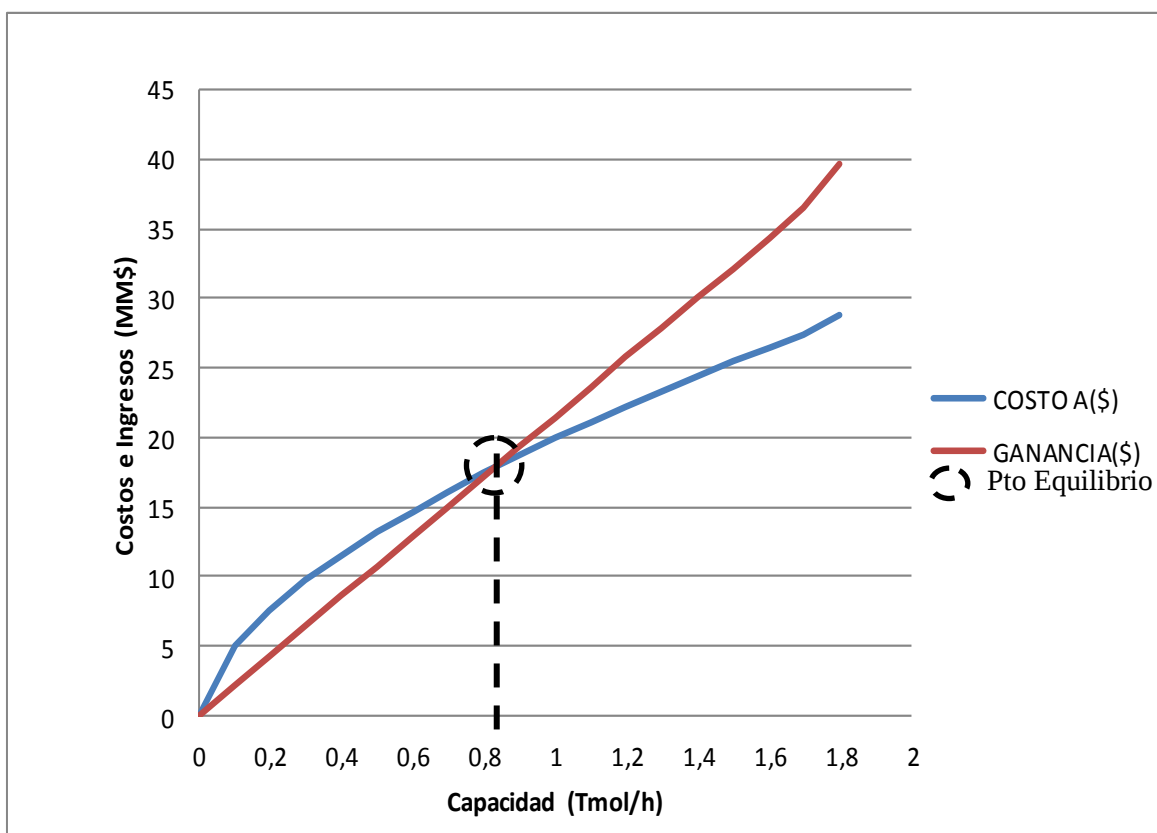
Para el caso del gas metano para uso industrial, la gráfica obtenida a partir de la Tabla N° 31 reseñada en el Anexo 1, es la siguiente:



**Figura N° 20.** Curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas industrial a nivel internacional

La Figura N° 20 representa la curva de rentabilidad en función de la capacidad para el gas industrial a nivel internacional con un comportamiento exponencial progresivo

ascendente, en ella se observa que las rentabilidades son negativas para capacidades de planta entre 0 y 0,8 Tmol/h (0-15,2 MMPCD). A partir del punto de inflexión de la curva ubicado alrededor de 0,3 Tmol/h (5,7 MMPCD) se observa que las rentabilidades empiezan a volverse positivas a medida en que la curva va aumentando progresivamente al ir aumentando las capacidades. Para sustentar el análisis de rentabilidad a partir de la Tabla N° 41 situada en el Anexo 2, se graficó el punto de equilibrio el cual se puede apreciar en la Figura N° 21.

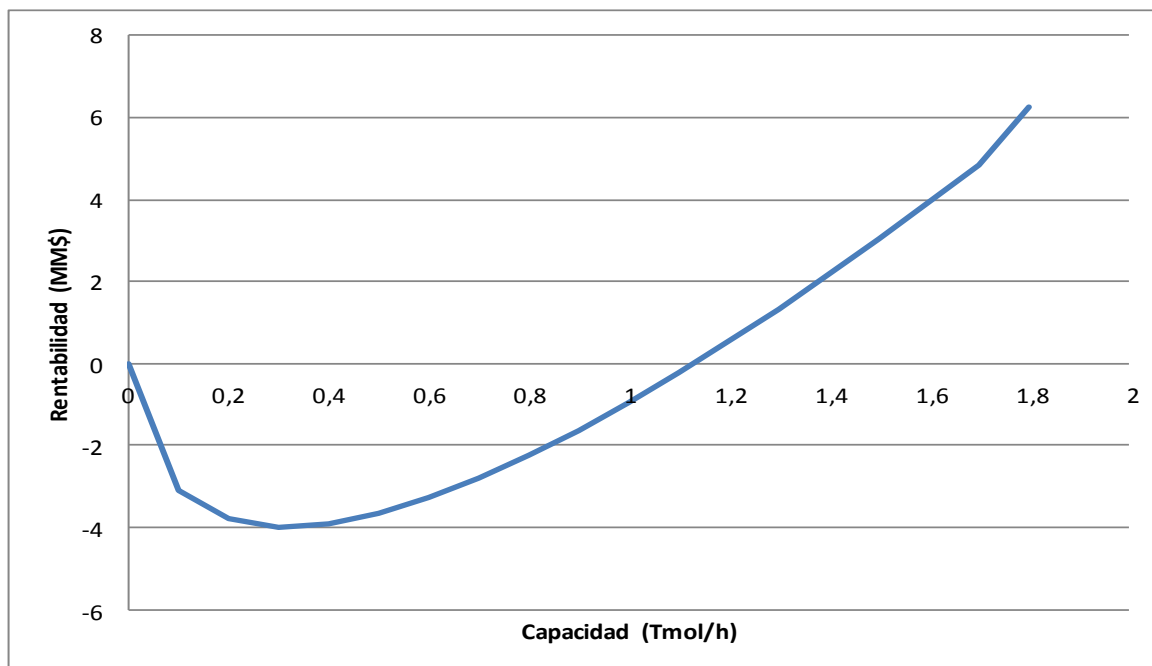


**Figura N° 21.** Punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas industrial a nivel internacional.

En la Figura N° 21 el punto de equilibrio obtenido se sitúa alrededor de 0,85 Tmol/h (16,1 MMPCD) este punto refleja que a capacidades menores a este, el proceso no es viable debido a que se obtienen un déficit de ganancias más sin embargo a capacidades mayores al punto de equilibrio es cuando se obtienen beneficios del

proceso por lo que al decidir operar a una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) resulta totalmente viable ya que la misma se encuentra por encima del punto de equilibrio y se garantiza que el proceso es económicamente rentable.

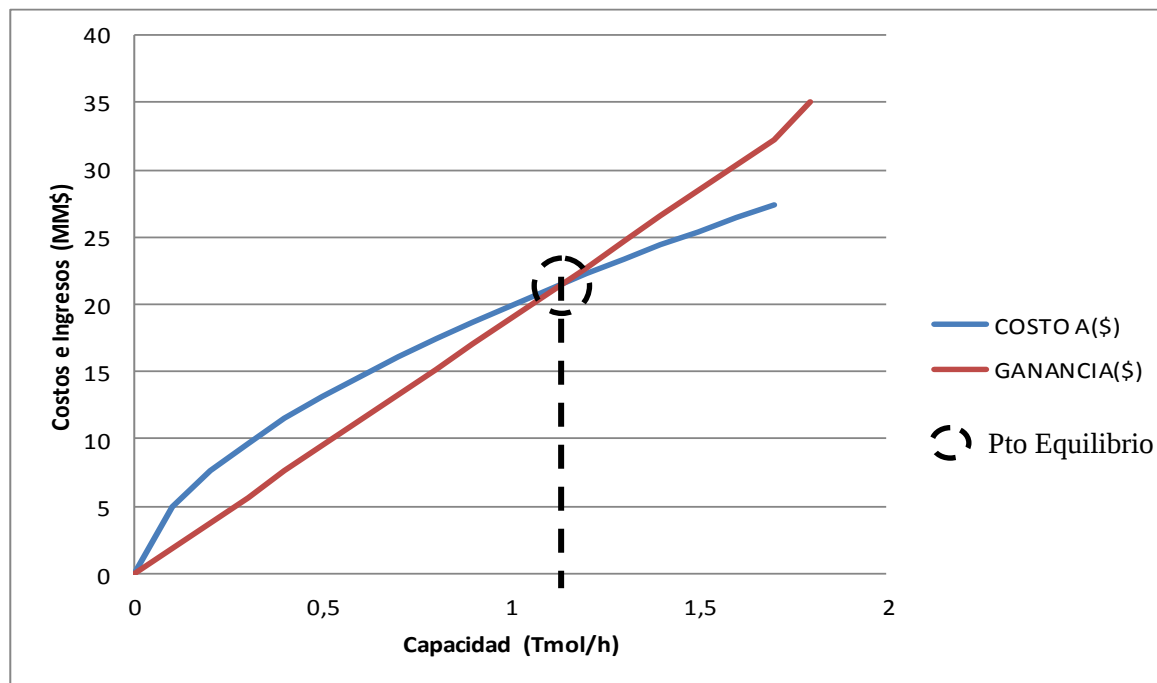
Al evaluar el caso del gas metano para uso doméstico la gráfica obtenida a partir de la Tabla N° 33 puntualizada en la sección de anexos, es la siguiente:



**Figura N° 22.** Curva de rentabilidad en función de la capacidad par gas doméstico a nivel internacional.

La Figura N° 22 representa la curva de rentabilidad en función de la capacidad para el gas doméstico a nivel internacional, al igual que el caso anterior, la curva muestra un comportamiento exponencial progresivo ascendente. Se puede observar que para capacidades de planta entre 0 y 1,1 Tmol/h (0-20,9 MMPCD) las rentabilidades son negativas. El punto de inflexión de la curva está ubicado alrededor de 0,3 Tmol/h (5,7 MMPCD) a partir de este las rentabilidades se vuelven positivas conjuntamente al incrementarse las capacidades. A capacidades mayores a 1,1 Tmol/h (20,9 MMPCD) es cuando el proceso presenta vías de rentabilidad. Para corroborar este análisis se

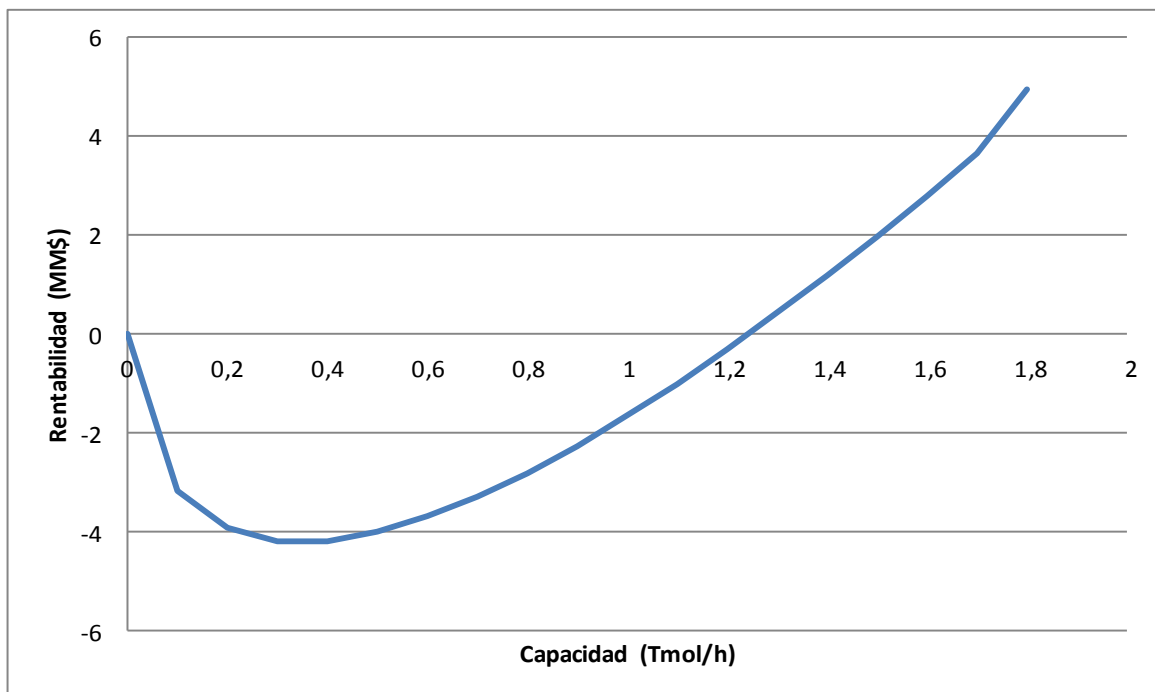
determinó el punto de equilibrio de manera gráfica a través de la Tabla N° 42 descrita en la sección de anexos, el cual se puede apreciar en la Figura N° 23.



**Figura N° 23.** Punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas doméstico a nivel internacional.

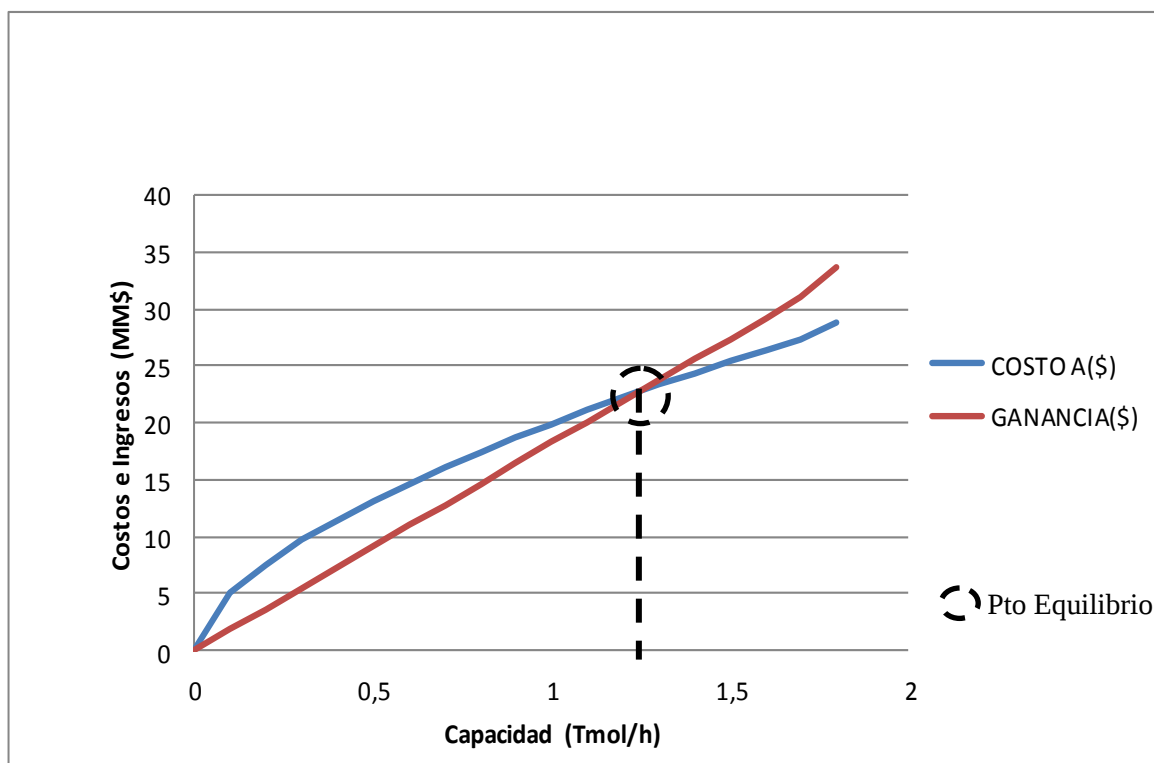
En la Figura N° 23 se expresa las relaciones entre la capacidad, los costos e ingresos a través de una gráfica de costo-capacidad-ganancia. El punto de equilibrio o umbral de rentabilidad se sitúa alrededor de 1,2 Tmol/h (22,8 MMPCD) este punto refleja que a capacidades menores a este, el proceso no es viable debido a que se está en un área deficitaria en la cual se obtienen pérdidas por lo que no es rentable operar a capacidades menores al punto de equilibrio, más sin embargo a capacidades mayores a éste, es cuando se obtienen realmente beneficios del proceso, por lo tanto, al decidir operar una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) resulta de igual manera, totalmente viable ya que ésta capacidad se encuentra por encima del punto de equilibrio obteniéndose utilidades (utilidad bruta).

Finalmente para el caso del gas metano para producción de energía, la gráfica obtenida al utilizar los datos de la Tabla N° 35 situada en el Anexo 1, es la siguiente:



**Figura N° 24.** Curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel internacional.

La Figura N° 24 representa la curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel internacional, al igual que en todos los casos anteriores, la curva presenta un comportamiento exponencial progresivo. Para este caso, se puede observar que para capacidades de planta entre 0 y 1,2 Tmol/h (0-22,8 MMPCD) las rentabilidades son negativas por lo que operar entre este rango de capacidades no es rentable. El punto de inflexión de la curva situado alrededor de 0,3 Tmol/h (5,7 MMPCD) refleja que el proceso comienza a ser rentable al aumentar las capacidades sin embargo es a partir de capacidades mayores a 1,2 Tmol/h (22,8 MMPCD) en donde las rentabilidades son siempre positivas al incrementarse las capacidades. Para analizar la rentabilidad del proceso, se graficó el punto de equilibrio de la curva mediante la utilización de los datos de la Tabla N° 43 del Anexo 2, dicho punto está representado en la Figura N° 25.



**Figura N° 25.** Punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel internacional

En la Figura N° 25 el punto de equilibrio obtenido está ubicado alrededor de 1,4 Tmol/h (26,6 MMPCD) por lo que a capacidades menores el proceso no es viable, sin embargo a capacidades mayores a éste, es cuando se obtienen beneficios del proceso, por lo que al decidir operar a una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) resulta factible ya que ésta capacidad se encuentra por encima del punto de equilibrio obteniéndose ganancias.

Al calcular el punto de equilibrio para cada caso bajo los dos escenarios producción se tiene que el escenario 2 es en donde se generan los mayores beneficios para el uso del gas natural ya que la capacidad de interés siempre se encuentra por encima del punto de equilibrio.

## IV.8 COMPARACIÓN ENTRE LOS CASOS

En la Tabla N° 18, se muestran los diferentes puntos de equilibrios obtenidos para cada caso.

**Tabla N° 18.** Puntos de equilibrio para cada una de las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional e internacional

| <b>CAPACIDAD MÁXIMA: 1,847 Tmol/h (35 MMPCD)</b>          |                                             |                |                                                  |                |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------|--------------------------------------------------|----------------|
| <b>Etapas que conforman la red de valorización del GN</b> | <b>Punto de Equilibrio (curva nacional)</b> |                | <b>Punto de Equilibrio (curva internacional)</b> |                |
|                                                           | <b>(Tmol/h)</b>                             | <b>(MMPCD)</b> | <b>(Tmol/h)</b>                                  | <b>(MMPCD)</b> |
| <b>Gas para uso Vehicular</b>                             | 2,5                                         | 47,4           | 1,6                                              | 30,2           |
| <b>Gas para uso Industrial</b>                            | 2,2                                         | 41,8           | 0,85                                             | 16,1           |
| <b>Gas para uso Doméstico</b>                             | 2,1                                         | 39,9           | 1,2                                              | 22,8           |
| <b>Gas para producc. Energía</b>                          | 2,4                                         | 45,5           | 1,4                                              | 26,6           |

Con el fin de determinar la rentabilidad del proceso, se calculó el punto de equilibrio para cada etapa, estos pueden observarse en la Tabla N° 19. Al comparar cada caso es fácil determinar que a nivel nacional con los precios regulados no se obtienen ganancias del proceso debido a que al tratar una capacidad máxima de gas de 1,847

Tmol/ h (35 MMPCD), se está por debajo del punto de equilibrio por lo que los costos totales son mayores a los ingresos totales, obteniéndose un déficit de ganancias, comportamiento que se repite en cada caso, ahora bien al considerar los precios que se manejan en el mercado internacional el escenario sería otro debido a que siempre resulta beneficioso operar a una capacidad de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) ya que esta siempre se encuentra por encima del punto de equilibrio generando ganancias.

A través de la Tabla N° 19 se observa que los puntos de equilibrio con mayor distorsión respecto al punto de interés están ubicados en las etapas donde se utiliza el gas para uso vehicular y para electricidad a nivel nacional. Esta situación hace referencia a que no es rentable procesar el gas para estos fines ya que no se obtienen ganancias, esta es la razón del por qué actualmente hay tantas deficiencias en estos sectores específicamente debido a que se está invirtiendo una gran cantidad de dinero sin garantía de recuperación.

Venezuela presenta un alto subsidio en el precio de los energéticos (gasolina, diésel, GLP, gas natural y electricidad), es por esta razón que al manejar los precios regulados las pérdidas operativas son constantes, estos precios no cubren los crecientes costos de producción, desmejorando la calidad del servicio lo cual genera el incremento de las pérdidas y consecuentemente el subsidio, este panorama no se refleja si se manejan los precios a nivel internacional.

De tal manera que es necesaria la revisión de los precios y tarifas de los energéticos en el mercado interno a fin de que se puedan obtener ganancias del proceso.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones establecidas por los resultados obtenidos.

#### **V.1 CONCLUSIONES**

- Al esquematizar el sistema de valorización del gas natural, se determinó que las etapas que lo conforman son: gas para uso vehicular, gas para uso industrial, gas para uso doméstico y gas para producción de energía.
- El costo total asociado a tratamiento, separación y transporte de los compuestos que conforman el gas de quema y/o venteo fue de 28.797.679 \$.
- Al evaluar el escenario 1 mediante el cálculo del punto de equilibrio, se determinó que al manejar los precios regulados en Venezuela, procesar una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) en cualquiera que sea el caso no resulta rentable ya que esta capacidad siempre se encuentra por debajo del punto de equilibrio, generando pérdidas constantes.
- Al evaluar el escenario 2 mediante el cálculo del punto de equilibrio, se determinó que al manejar los precios a nivel internacional, procesar una capacidad máxima de gas de 1,847 Tmol/h (35 MMPCD) en cualquiera que sea el caso resulta económicamente rentable ya que esta capacidad se encuentra siempre por encima del punto de equilibrio, obteniéndose ganancias del proceso.

- El escenario de producción en el cual se obtienen los mejores beneficios para el uso del gas natural, es el escenario 2.
- Los puntos de equilibrio con mayor distorsión respecto al punto de interés (1,847 Tmol/h) a nivel nacional, están ubicados en las etapas donde se utiliza el gas para uso vehicular y para producción de energía.

#### **V.4 RECOMENDACIONES**

- Es necesaria la revisión de los precios y tarifas de los energéticos en el mercado nacional a fin de obtener ganancias del proceso.
- Realizar un programa en Excel con el objetivo de evaluar los escenarios planteados, en donde el operador tenga la oportunidad de introducir datos de composición y cantidad de gas a procesar así como también especificar si empleará los precios nacionales o los internacionales de tal forma que el programa le genere las curvas de rentabilidad y las del punto de equilibrio y además le informe si el proceso es rentable o no con los datos suministrados.
- Estudiar otros escenarios de producción para el aprovechamiento del gas de quema y/o venteo como: reinyección a pozo y venta de gas licuado de petróleo (GLP) para la industria petroquímica a nivel nacional.
- Realizar un estudio económico a partir del punto de equilibrio para reintegro de capital.

## BIBLIOGRAFÍA

**La Rosa, Lorena.** (2010). Valorización del gas natural asociado destinado a la quema y/o venteo en las instalaciones petroleras del distrito norte de PDVSA, estado Monagas, Venezuela. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela.

**Rodríguez, Karen.** (2010). Aprovechamiento del gas de quema y/o venteo en la generación de electricidad para satisfacer necesidades energéticas en comunidades aledañas a las instalaciones del distrito norte. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela.

**Nastenka, Azuaje.** (2010). Valorización del gas de baja presión como recurso energético en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo-Venezuela. Trabajo de Maestría. Universidad Central de Venezuela.

**García L, Franklin.** (2011). Estimación técnico económica de la separación de los compuestos de gas licuado de petróleo a partir de gases de quema y/o venteo. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela. Venezuela, Caracas.

**Gragirena, Kharlys.** (2011). Simulación de una planta de generación eléctrica utilizando gas de baja presión del Distrito Norte del estado Monagas, como combustible en un ciclo de potencia. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

**Medina, Fernando.** (2012). Determinación de los parámetros óptimos de operación de una planta procesadora de gas natural, mediante análisis técnico económico de rentabilidad y producción. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

**Álvarez, Sabrina.** (2013). Viabilidad de la separación de los gases de quema y/o venteo en los Distritos del Lago Norte y Sur de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo. Trabajo de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

**Carruido, Marifé.** (2013). Determinación de los parámetros de operación de una planta de tratamiento de gases de quema y/o venteo. Trabajo de Grado, Caracas.

**FONDONORMA.** (2000). **COVENIN 3568-2:2000** Gas Natural. Características mínimas de calidad. Parte 2: Gas de uso general para sistemas de transporte troncales de libre acceso. Caracas: FONDONORMA.

**García, M. I.** (2007). El cambio climático llegó a Venezuela. PRODUCTO ONLINE. Ed 286.

**Sallenave, Jean. P.** Gerencia y Planeación Estratégica. Colombia.

**T.K. Ghosh and M.A. Prelas.** ENERGY RESOURCES AND SYSTEMS: VOLUME 1: FUNDAMENTALS AND NON-RENEWABLE RESOURCES, 281–381. © Springer Science + Business Media B.V. 2009.

**Park, Chan. S.** (2009). Fundamentos de Ingeniería Económica. México.

**L. Blank and A. Tarquin.** (2012). Ingeniería Económica. México

**W. Sullivan, E. Wicks and J. Luxhoj.** (2004). Ingeniería Económica de Degarmo. México.

**Metodología para la Construcción de Escenarios.** Obtenida el 13 de julio de 2013, de <http://www.conduces.com.ar/escenarios-completos.pdf>

**Transporte por tuberías.** Obtenida el 13 de julio de 2013, de <http://wwwapps.tc.gc.ca/saf-sec-sur/3/erg-gmu/gre/tuberia.aspx>

**Recolección de Gas Natural.** Obtenida el 13 de julio de 2013, de <http://es.arielcorp.com/applications/markets.aspx?id=561>

**Petróleos de Venezuela S, A.** (2005). Página web de Petróleos de Venezuela S, A: [www.pdvsa.com](http://www.pdvsa.com). [Consulta: 2013, julio 13]

**Ente Nacional del Gas.** (2002). Normas técnicas aplicables a la calidad del gas (NTA).

**Hernández, Nelson.** (2012). El Precio de las Energías en Venezuela.

## ANEXOS

### ANEXO 1. METODOLOGÍA Y ECUACIONES UTILIZADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS GRÁFICAS DE RENTABILIDAD EN FUNCIÓN DE LA CAPACIDAD DE PLANTA PARA CADA ETAPA QUE CONFORMA LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL

1. ECUACIÓN UTILIZADA PARA DETERMINAR LA GANANCIA DE CADA ETAPA QUE CONFORMA LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL

$$G(\$) = (P1 * C1) + (P2 * C2) + (P3 * C3) + (P4 * C4)$$

Para 1,847 Tmol/h, la ganancia para gas vehicular a nivel nacional es:

$$G = (0,24 * 245.116,8) + (660 * 8.449,92) + (790 * 13.098,24) + (835 * 11.888,64)$$

$$G = 25.909.519 \$$$

En donde:

$G$  = ganancia, (\$)

$P1$  = precio de venta de c/u de la etapas que conforman el sistema de valorización del gas natural, (\$/Ton).

$P2$  = precio de venta del etano en el mercado nacional, (\$/Ton).

$P3$  = precio de venta del propano en el mercado nacional, (\$/Ton).

$P4$  = precio de venta de butanos en el mercado nacional, (\$/Ton).

$C1$  = toneladas obtenidas de metano a nivel nacional, (Ton/año).

$C2$  = toneladas obtenidas de etano a nivel nacional, (Ton/año).

C3 = toneladas obtenidas de propano a nivel nacional, (Ton/año).

C4 = toneladas obtenidas de butanos a nivel nacional, (Ton/año).

En las Tablas N° 19 y 20 extraídas de Excel, se presentan las ganancias obtenidas para el gas vehicular a diferentes capacidades a nivel nacional e internacional.

**Tabla N° 19.** Ganancias obtenidas para gas vehicular a nivel nacional

| CAPACIDAD<br>(TMOL/H) | METANO(TON/AÑO) | ETANO<br>(TON/AÑO) | PROPANO<br>(TON/AÑO) | BUTANOS<br>(TON/AÑO) | GANANCIA(\$) |
|-----------------------|-----------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| <b>1,8</b>            | 245116,8        | 8449,92            | 13098,24             | 11888,64             | 25909519,26  |
| <b>1,7</b>            | 225608,3162     | 7777,403357        | 12055,77044          | 10942,44071          | 23847418,92  |
| <b>1,6</b>            | 212337,2388     | 7319,909042        | 11346,60747          | 10298,76773          | 22444629,57  |
| <b>1,5</b>            | 199066,1613     | 6862,414727        | 10637,4445           | 9655,094748          | 21041840,22  |
| <b>1,4</b>            | 185795,0839     | 6404,920411        | 9928,281538          | 9011,421765          | 19639050,88  |
| <b>1,3</b>            | 172524,0065     | 5947,426096        | 9219,118571          | 8367,748782          | 18236261,53  |
| <b>1,2</b>            | 159252,9291     | 5489,931781        | 8509,955604          | 7724,075799          | 16833472,18  |
| <b>1,1</b>            | 145981,8517     | 5032,437466        | 7800,792637          | 7080,402815          | 15430682,83  |
| <b>1</b>              | 132710,7742     | 4574,943151        | 7091,62967           | 6436,729832          | 14027893,48  |
| <b>0,9</b>            | 119439,6968     | 4117,448836        | 6382,466703          | 5793,056849          | 12625104,13  |
| <b>0,8</b>            | 106168,6194     | 3659,954521        | 5673,303736          | 5149,383866          | 11222314,79  |
| <b>0,7</b>            | 92897,54196     | 3202,460206        | 4964,140769          | 4505,710883          | 9819525,438  |
| <b>0,6</b>            | 79626,46454     | 2744,965891        | 4254,977802          | 3862,037899          | 8416736,09   |
| <b>0,5</b>            | 66355,38711     | 2287,471576        | 3545,814835          | 3218,364916          | 7013946,741  |
| <b>0,4</b>            | 53084,30969     | 1829,97726         | 2836,651868          | 2574,691933          | 5611157,393  |
| <b>0,3</b>            | 39813,23227     | 1372,482945        | 2127,488901          | 1931,01895           | 4208368,045  |
| <b>0,2</b>            | 26542,15485     | 914,9886302        | 1418,325934          | 1287,345966          | 2805578,697  |
| <b>0,1</b>            | 13271,07742     | 457,4943151        | 709,162967           | 643,6729832          | 1402789,348  |
| <b>0</b>              | 0               | 0                  | 0                    | 0                    | 0            |

**Tabla 20.** Ganancias obtenidas para gas vehicular a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(TMOL/H)</b> | <b>METANO(TON/AÑO)</b> | <b>ETANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>PROPANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>BUTANOS<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>GANANCIA(\$)</b> |
|-------------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>1,8</b>                    | 245116,8               | 8449,92                    | 13098,24                     | 11888,64                     | 30880518,64         |
| <b>1,7</b>                    | 225608,3162            | 7777,403357                | 12055,77044                  | 10942,44071                  | 28422783,81         |
| <b>1,6</b>                    | 212337,2388            | 7319,909042                | 11346,60747                  | 10298,76773                  | 26750855,35         |
| <b>1,5</b>                    | 199066,1613            | 6862,414727                | 10637,4445                   | 9655,094748                  | 25078926,89         |
| <b>1,4</b>                    | 185795,0839            | 6404,920411                | 9928,281538                  | 9011,421765                  | 23406998,43         |
| <b>1,3</b>                    | 172524,0065            | 5947,426096                | 9219,118571                  | 8367,748782                  | 21735069,97         |
| <b>1,2</b>                    | 159252,9291            | 5489,931781                | 8509,955604                  | 7724,075799                  | 20063141,51         |
| <b>1,1</b>                    | 145981,8517            | 5032,437466                | 7800,792637                  | 7080,402815                  | 18391213,05         |
| <b>1</b>                      | 132710,7742            | 4574,943151                | 7091,62967                   | 6436,729832                  | 16719284,59         |
| <b>0,9</b>                    | 119439,6968            | 4117,448836                | 6382,466703                  | 5793,056849                  | 15047356,13         |
| <b>0,8</b>                    | 106168,6194            | 3659,954521                | 5673,303736                  | 5149,383866                  | 13375427,68         |
| <b>0,7</b>                    | 92897,54196            | 3202,460206                | 4964,140769                  | 4505,710883                  | 11703499,22         |
| <b>0,6</b>                    | 79626,46454            | 2744,965891                | 4254,977802                  | 3862,037899                  | 10031570,76         |
| <b>0,5</b>                    | 66355,38711            | 2287,471576                | 3545,814835                  | 3218,364916                  | 8359642,297         |
| <b>0,4</b>                    | 53084,30969            | 1829,97726                 | 2836,651868                  | 2574,691933                  | 6687713,838         |
| <b>0,3</b>                    | 39813,23227            | 1372,482945                | 2127,488901                  | 1931,01895                   | 5015785,378         |
| <b>0,2</b>                    | 26542,15485            | 914,9886302                | 1418,325934                  | 1287,345966                  | 3343856,919         |
| <b>0,1</b>                    | 13271,07742            | 457,4943151                | 709,162967                   | 643,6729832                  | 1671928,459         |
| <b>0</b>                      | 0                      | 0                          | 0                            | 0                            | 0                   |

Las ganancias obtenidas para el gas industrial a diferentes capacidades a nivel nacional e internacional se presentan en las Tablas N° 21 y 22.

**Tabla N° 21.** Ganancias obtenidas para gas industrial a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(TMOL/H)</b> | <b>METANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>ETANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>PROPANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>BUTANOS<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>GANANCIA(\$)</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>1,8</b>                    | 245116,8                    | 8449,92                    | 13098,24                     | 11888,64                     | 26664934,92         |
| <b>1,7</b>                    | 225608,3162                 | 7777,403357                | 12055,77044                  | 10942,44071                  | 24542712,17         |
| <b>1,6</b>                    | 212337,2388                 | 7319,909042                | 11346,60747                  | 10298,76773                  | 23099023,22         |
| <b>1,5</b>                    | 199066,1613                 | 6862,414727                | 10637,4445                   | 9655,094748                  | 21655334,26         |
| <b>1,4</b>                    | 185795,0839                 | 6404,920411                | 9928,281538                  | 9011,421765                  | 20211645,31         |
| <b>1,3</b>                    | 172524,0065                 | 5947,426096                | 9219,118571                  | 8367,748782                  | 18767956,36         |
| <b>1,2</b>                    | 159252,9291                 | 5489,931781                | 8509,955604                  | 7724,075799                  | 17324267,41         |
| <b>1,1</b>                    | 145981,8517                 | 5032,437466                | 7800,792637                  | 7080,402815                  | 15880578,46         |
| <b>1</b>                      | 132710,7742                 | 4574,943151                | 7091,62967                   | 6436,729832                  | 14436889,51         |
| <b>0,9</b>                    | 119439,6968                 | 4117,448836                | 6382,466703                  | 5793,056849                  | 12993200,56         |
| <b>0,8</b>                    | 106168,6194                 | 3659,954521                | 5673,303736                  | 5149,383866                  | 11549511,61         |
| <b>0,7</b>                    | 92897,54196                 | 3202,460206                | 4964,140769                  | 4505,710883                  | 10105822,66         |
| <b>0,6</b>                    | 79626,46454                 | 2744,965891                | 4254,977802                  | 3862,037899                  | 8662133,706         |
| <b>0,5</b>                    | 66355,38711                 | 2287,471576                | 3545,814835                  | 3218,364916                  | 7218444,755         |
| <b>0,4</b>                    | 53084,30969                 | 1829,97726                 | 2836,651868                  | 2574,691933                  | 5774755,804         |
| <b>0,3</b>                    | 39813,23227                 | 1372,482945                | 2127,488901                  | 1931,01895                   | 4331066,853         |
| <b>0,2</b>                    | 26542,15485                 | 914,9886302                | 1418,325934                  | 1287,345966                  | 2887377,902         |
| <b>0,1</b>                    | 13271,07742                 | 457,4943151                | 709,162967                   | 643,6729832                  | 1443688,951         |
| <b>0</b>                      | 0                           | 0                          | 0                            | 0                            | 0                   |

**Tabla N° 22.** Ganancias obtenidas para gas industrial a nivel internacional

| CAPACIDAD<br>(TMOL/H) | METANO<br>(TON/AÑO) | ETANO<br>(TON/AÑO) | PROPANO<br>(TON/AÑO) | BUTANOS<br>(TON/AÑO) | GANANCIA(\$) |
|-----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| <b>1,8</b>            | 245116,8            | 8449,92            | 13098,24             | 11888,64             | 39585415,29  |
| <b>1,7</b>            | 225608,3162         | 7777,403357        | 12055,77044          | 10942,44071          | 36434870,6   |
| <b>1,6</b>            | 212337,2388         | 7319,909042        | 11346,60747          | 10298,76773          | 34291642,92  |
| <b>1,5</b>            | 199066,1613         | 6862,414727        | 10637,4445           | 9655,094748          | 32148415,24  |
| <b>1,4</b>            | 185795,0839         | 6404,920411        | 9928,281538          | 9011,421765          | 30005187,55  |
| <b>1,3</b>            | 172524,0065         | 5947,426096        | 9219,118571          | 8367,748782          | 27861959,87  |
| <b>1,2</b>            | 159252,9291         | 5489,931781        | 8509,955604          | 7724,075799          | 25718732,19  |
| <b>1,1</b>            | 145981,8517         | 5032,437466        | 7800,792637          | 7080,402815          | 23575504,51  |
| <b>1</b>              | 132710,7742         | 4574,943151        | 7091,62967           | 6436,729832          | 21432276,82  |
| <b>0,9</b>            | 119439,6968         | 4117,448836        | 6382,466703          | 5793,056849          | 19289049,14  |
| <b>0,8</b>            | 106168,6194         | 3659,954521        | 5673,303736          | 5149,383866          | 17145821,46  |
| <b>0,7</b>            | 92897,54196         | 3202,460206        | 4964,140769          | 4505,710883          | 15002593,78  |
| <b>0,6</b>            | 79626,46454         | 2744,965891        | 4254,977802          | 3862,037899          | 12859366,09  |
| <b>0,5</b>            | 66355,38711         | 2287,471576        | 3545,814835          | 3218,364916          | 10716138,41  |
| <b>0,4</b>            | 53084,30969         | 1829,97726         | 2836,651868          | 2574,691933          | 8572910,73   |
| <b>0,3</b>            | 39813,23227         | 1372,482945        | 2127,488901          | 1931,01895           | 6429683,047  |
| <b>0,2</b>            | 26542,15485         | 914,9886302        | 1418,325934          | 1287,345966          | 4286455,365  |
| <b>0,1</b>            | 13271,07742         | 457,4943151        | 709,162967           | 643,6729832          | 2143227,682  |
| <b>0</b>              | 0                   | 0                  | 0                    | 0                    | 0            |

En las Tablas N° 23 y 24 extraídas de Excel se presentan las ganancias obtenidas para el gas doméstico a diferentes capacidades a nivel nacional e internacional.

**Tabla N° 23.** Ganancias obtenidas para gas doméstico a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(TMOL/H)</b> | <b>METANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>ETANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>PROPANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>BUTANOS<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>GANANCIA(\$)</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>1,8</b>                    | 245116,8                    | 8449,92                    | 13098,24                     | 11888,64                     | 27478301,1          |
| <b>1,7</b>                    | 225608,3162                 | 7777,403357                | 12055,77044                  | 10942,44071                  | 25291343,73         |
| <b>1,6</b>                    | 212337,2388                 | 7319,909042                | 11346,60747                  | 10298,76773                  | 23803617,63         |
| <b>1,5</b>                    | 199066,1613                 | 6862,414727                | 10637,4445                   | 9655,094748                  | 22315891,53         |
| <b>1,4</b>                    | 185795,0839                 | 6404,920411                | 9928,281538                  | 9011,421765                  | 20828165,42         |
| <b>1,3</b>                    | 172524,0065                 | 5947,426096                | 9219,118571                  | 8367,748782                  | 19340439,32         |
| <b>1,2</b>                    | 159252,9291                 | 5489,931781                | 8509,955604                  | 7724,075799                  | 17852713,22         |
| <b>1,1</b>                    | 145981,8517                 | 5032,437466                | 7800,792637                  | 7080,402815                  | 16364987,12         |
| <b>1</b>                      | 132710,7742                 | 4574,943151                | 7091,62967                   | 6436,729832                  | 14877261,02         |
| <b>0,9</b>                    | 119439,6968                 | 4117,448836                | 6382,466703                  | 5793,056849                  | 13389534,92         |
| <b>0,8</b>                    | 106168,6194                 | 3659,954521                | 5673,303736                  | 5149,383866                  | 11901808,81         |
| <b>0,7</b>                    | 92897,54196                 | 3202,460206                | 4964,140769                  | 4505,710883                  | 10414082,71         |
| <b>0,6</b>                    | 79626,46454                 | 2744,965891                | 4254,977802                  | 3862,037899                  | 8926356,61          |
| <b>0,5</b>                    | 66355,38711                 | 2287,471576                | 3545,814835                  | 3218,364916                  | 7438630,509         |
| <b>0,4</b>                    | 53084,30969                 | 1829,97726                 | 2836,651868                  | 2574,691933                  | 5950904,407         |
| <b>0,3</b>                    | 39813,23227                 | 1372,482945                | 2127,488901                  | 1931,01895                   | 4463178,305         |
| <b>0,2</b>                    | 26542,15485                 | 914,9886302                | 1418,325934                  | 1287,345966                  | 2975452,203         |
| <b>0,1</b>                    | 13271,07742                 | 457,4943151                | 709,162967                   | 643,6729832                  | 1487726,102         |
| <b>0</b>                      | 0                           | 0                          | 0                            | 0                            | 0                   |

**Tabla N° 24.** Ganancias obtenidas para gas doméstico a nivel internacional

| CAPACIDAD<br>(TMOL/H) | METANO<br>(TON/AÑO) | ETANO<br>(TON/AÑO) | PROPANO<br>(TON/AÑO) | BUTANOS<br>(TON/AÑO) | GANANCIA(\$) |
|-----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| <b>1,8</b>            | 245116,8            | 8449,92            | 13098,24             | 11888,64             | 35030574,03  |
| <b>1,7</b>            | 225608,3162         | 7777,403357        | 12055,77044          | 10942,44071          | 32242542,42  |
| <b>1,6</b>            | 212337,2388         | 7319,909042        | 11346,60747          | 10298,76773          | 30345922,28  |
| <b>1,5</b>            | 199066,1613         | 6862,414727        | 10637,4445           | 9655,094748          | 28449302,13  |
| <b>1,4</b>            | 185795,0839         | 6404,920411        | 9928,281538          | 9011,421765          | 26552681,99  |
| <b>1,3</b>            | 172524,0065         | 5947,426096        | 9219,118571          | 8367,748782          | 24656061,85  |
| <b>1,2</b>            | 159252,9291         | 5489,931781        | 8509,955604          | 7724,075799          | 22759441,71  |
| <b>1,1</b>            | 145981,8517         | 5032,437466        | 7800,792637          | 7080,402815          | 20862821,56  |
| <b>1</b>              | 132710,7742         | 4574,943151        | 7091,62967           | 6436,729832          | 18966201,42  |
| <b>0,9</b>            | 119439,6968         | 4117,448836        | 6382,466703          | 5793,056849          | 17069581,28  |
| <b>0,8</b>            | 106168,6194         | 3659,954521        | 5673,303736          | 5149,383866          | 15172961,14  |
| <b>0,7</b>            | 92897,54196         | 3202,460206        | 4964,140769          | 4505,710883          | 13276341     |
| <b>0,6</b>            | 79626,46454         | 2744,965891        | 4254,977802          | 3862,037899          | 11379720,85  |
| <b>0,5</b>            | 66355,38711         | 2287,471576        | 3545,814835          | 3218,364916          | 9483100,711  |
| <b>0,4</b>            | 53084,30969         | 1829,97726         | 2836,651868          | 2574,691933          | 7586480,569  |
| <b>0,3</b>            | 39813,23227         | 1372,482945        | 2127,488901          | 1931,01895           | 5689860,427  |
| <b>0,2</b>            | 26542,15485         | 914,9886302        | 1418,325934          | 1287,345966          | 3793240,285  |
| <b>0,1</b>            | 13271,07742         | 457,4943151        | 709,162967           | 643,6729832          | 1896620,142  |
| <b>0</b>              | 0                   | 0                  | 0                    | 0                    | 0            |

Las ganancias obtenidas del gas para producción de energía a diferentes capacidades a nivel nacional e internacional se presentan en las Tablas N° 25 y 26.

**Tabla N° 25.** Ganancias obtenidas del gas para producción de energía a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(TMOL/H)</b> | <b>METANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>ETANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>PROPANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>BUTANOS<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>GANANCIA(\$)</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>1,8</b>                    | 245116,8                    | 8449,92                    | 13098,24                     | 11888,64                     | 25935915,89         |
| <b>1,7</b>                    | 225608,3162                 | 7777,403357                | 12055,77044                  | 10942,44071                  | 23871714,68         |
| <b>1,6</b>                    | 212337,2388                 | 7319,909042                | 11346,60747                  | 10298,76773                  | 22467496,17         |
| <b>1,5</b>                    | 199066,1613                 | 6862,414727                | 10637,4445                   | 9655,094748                  | 21063277,66         |
| <b>1,4</b>                    | 185795,0839                 | 6404,920411                | 9928,281538                  | 9011,421765                  | 19659059,15         |
| <b>1,3</b>                    | 172524,0065                 | 5947,426096                | 9219,118571                  | 8367,748782                  | 18254840,64         |
| <b>1,2</b>                    | 159252,9291                 | 5489,931781                | 8509,955604                  | 7724,075799                  | 16850622,13         |
| <b>1,1</b>                    | 145981,8517                 | 5032,437466                | 7800,792637                  | 7080,402815                  | 15446403,62         |
| <b>1</b>                      | 132710,7742                 | 4574,943151                | 7091,62967                   | 6436,729832                  | 14042185,11         |
| <b>0,9</b>                    | 119439,6968                 | 4117,448836                | 6382,466703                  | 5793,056849                  | 12637966,6          |
| <b>0,8</b>                    | 106168,6194                 | 3659,954521                | 5673,303736                  | 5149,383866                  | 11233748,08         |
| <b>0,7</b>                    | 92897,54196                 | 3202,460206                | 4964,140769                  | 4505,710883                  | 9829529,574         |
| <b>0,6</b>                    | 79626,46454                 | 2744,965891                | 4254,977802                  | 3862,037899                  | 8425311,064         |
| <b>0,5</b>                    | 66355,38711                 | 2287,471576                | 3545,814835                  | 3218,364916                  | 7021092,553         |
| <b>0,4</b>                    | 53084,30969                 | 1829,97726                 | 2836,651868                  | 2574,691933                  | 5616874,042         |
| <b>0,3</b>                    | 39813,23227                 | 1372,482945                | 2127,488901                  | 1931,01895                   | 4212655,532         |
| <b>0,2</b>                    | 26542,15485                 | 914,9886302                | 1418,325934                  | 1287,345966                  | 2808437,021         |
| <b>0,1</b>                    | 13271,07742                 | 457,4943151                | 709,162967                   | 643,6729832                  | 1404218,511         |
| <b>0</b>                      | 0                           | 0                          | 0                            | 0                            | 0                   |

**Tabla N° 26.** Ganancias obtenidas del gas para producción de energía a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(TMOL/H)</b> | <b>METANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>ETANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>PROPANO<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>BUTANOS<br/>(TON/AÑO)</b> | <b>GANANCIA(\$)</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>1,8</b>                    | 245116,8                    | 8449,92                    | 13098,24                     | 11888,64                     | 33729190,11         |
| <b>1,7</b>                    | 225608,3162                 | 7777,403357                | 12055,77044                  | 10942,44071                  | 31044733,72         |
| <b>1,6</b>                    | 212337,2388                 | 7319,909042                | 11346,60747                  | 10298,76773                  | 29218572,91         |
| <b>1,5</b>                    | 199066,1613                 | 6862,414727                | 10637,4445                   | 9655,094748                  | 27392412,11         |
| <b>1,4</b>                    | 185795,0839                 | 6404,920411                | 9928,281538                  | 9011,421765                  | 25566251,3          |
| <b>1,3</b>                    | 172524,0065                 | 5947,426096                | 9219,118571                  | 8367,748782                  | 23740090,49         |
| <b>1,2</b>                    | 159252,9291                 | 5489,931781                | 8509,955604                  | 7724,075799                  | 21913929,69         |
| <b>1,1</b>                    | 145981,8517                 | 5032,437466                | 7800,792637                  | 7080,402815                  | 20087768,88         |
| <b>1</b>                      | 132710,7742                 | 4574,943151                | 7091,62967                   | 6436,729832                  | 18261608,07         |
| <b>0,9</b>                    | 119439,6968                 | 4117,448836                | 6382,466703                  | 5793,056849                  | 16435447,26         |
| <b>0,8</b>                    | 106168,6194                 | 3659,954521                | 5673,303736                  | 5149,383866                  | 14609286,46         |
| <b>0,7</b>                    | 92897,54196                 | 3202,460206                | 4964,140769                  | 4505,710883                  | 12783125,65         |
| <b>0,6</b>                    | 79626,46454                 | 2744,965891                | 4254,977802                  | 3862,037899                  | 10956964,84         |
| <b>0,5</b>                    | 66355,38711                 | 2287,471576                | 3545,814835                  | 3218,364916                  | 9130804,036         |
| <b>0,4</b>                    | 53084,30969                 | 1829,97726                 | 2836,651868                  | 2574,691933                  | 7304643,229         |
| <b>0,3</b>                    | 39813,23227                 | 1372,482945                | 2127,488901                  | 1931,01895                   | 5478482,421         |
| <b>0,2</b>                    | 26542,15485                 | 914,9886302                | 1418,325934                  | 1287,345966                  | 3652321,614         |
| <b>0,1</b>                    | 13271,07742                 | 457,4943151                | 709,162967                   | 643,6729832                  | 1826160,807         |
| <b>0</b>                      | 0                           | 0                          | 0                            | 0                            | 0                   |

## 2. ECUACIÓN DE PREDICCIÓN DE COSTOS PARA DETERMINAR EL COSTO TOTAL A DIFERENTES CAPACIDADES

$$\text{Costo A} = \text{Costo B} \left( \frac{\text{Capacidad A}}{\text{Capacidad B}} \right)^n$$

En donde:

*Costo A* = costo capacidad en estudio (requerida), (\$)

*Costo B* = costo capacidad conocida, (\$)

*Capacidad A* = capacidad en estudio (Tmol/h)

*Capacidad B* = capacidad conocida determinada a partir del caso base, (Tmol/h)

*n* = factor de capacidad- costo, exponente de corrección que depende del tipo de planta. Usualmente (0,45-0,70), (adimensional).

Para este caso, se utilizó:

*n*=6 para plantas

Costo B= 28.797.679 \$

Capacidad B= 1,847 Tmol/h

Para todas las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional e internacional se tiene que:

$$\text{Costo A} = 28.797.679 * \left( \frac{1,7}{1,8} \right)^{0,6} = 27.399.756 \$$$

En la Tabla N° 27 se presentan los costos totales obtenidos a diferentes capacidades utilizando la ecuación de predicción de costos.

**Tabla N° 27.** Costos totales obtenidos para todas las etapas que conforman la red de valorización del gas natural a nivel nacional e internacional

| <b>COSTO A (\$)</b> | <b>CAPACIDAD A (Tmol/h)</b> |
|---------------------|-----------------------------|
| <b>28797679</b>     | <b>1,8</b>                  |
| <b>27399756,42</b>  | <b>1,7</b>                  |
| <b>26421005,34</b>  | <b>1,6</b>                  |
| <b>25417457,42</b>  | <b>1,5</b>                  |
| <b>24386763,73</b>  | <b>1,4</b>                  |
| <b>23326165,93</b>  | <b>1,3</b>                  |
| <b>22232387,16</b>  | <b>1,2</b>                  |
| <b>21101482,12</b>  | <b>1,1</b>                  |
| <b>19928625,65</b>  | <b>1</b>                    |
| <b>18707805,88</b>  | <b>0,9</b>                  |
| <b>17431362,78</b>  | <b>0,8</b>                  |
| <b>16089263,83</b>  | <b>0,7</b>                  |
| <b>14667905,37</b>  | <b>0,6</b>                  |
| <b>13147989,6</b>   | <b>0,5</b>                  |
| <b>11500410,54</b>  | <b>0,4</b>                  |
| <b>9677208,584</b>  | <b>0,3</b>                  |
| <b>7587441,342</b>  | <b>0,2</b>                  |
| <b>5005844,436</b>  | <b>0,1</b>                  |
| <b>0</b>            | <b>0</b>                    |

3. ECUACIÓN UTILIZADA PARA CALCULAR LA RENTABILIDAD PARA CADA ETAPA QUE CONFORMA LA RED DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A DIFERENTES CAPACIDADES

$$R = G - CT$$

En donde:

$R$  = rentabilidad, (\$)

$GP$  = Ganancia de los Productos, (\$)

$CT$  = Costo total, (\$)

Para 1,847 Tmol/h, la rentabilidad para gas vehicular a nivel nacional es:

$$R = 25.909.519 - 28.797.679 = -2.888.159 \$$$

En la Tablas N° 28 y 29 extraídas de Excel, se presentan las rentabilidades obtenidas a diferentes capacidades para el caso del gas vehicular a nivel nacional e internacional.

**Tabla N° 28.** Rentabilidad obtenida para el caso de gas vehicular a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD (Tmol/h)</b> | <b>RENTABILIDAD (\$)</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| <b>1,8</b>                | -2888159,737             |
| <b>1,7</b>                | -3552337,498             |
| <b>1,6</b>                | -3976375,763             |
| <b>1,5</b>                | -4375617,191             |
| <b>1,4</b>                | -4747712,85              |
| <b>1,3</b>                | -5089904,398             |
| <b>1,2</b>                | -5398914,984             |
| <b>1,1</b>                | -5670799,291             |
| <b>1</b>                  | -5900732,165             |
| <b>0,9</b>                | -6082701,745             |
| <b>0,8</b>                | -6209047,989             |
| <b>0,7</b>                | -6269738,389             |
| <b>0,6</b>                | -6251169,279             |
| <b>0,5</b>                | -6134042,855             |
| <b>0,4</b>                | -5889253,146             |
| <b>0,3</b>                | -5468840,539             |
| <b>0,2</b>                | -4781862,645             |
| <b>0,1</b>                | -3603055,088             |
| <b>0</b>                  | 0                        |

**Tabla N° 29.** Rentabilidad obtenida para el caso de gas vehicular a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD (Tmol/h)</b> | <b>RENTABILIDAD (\$)</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| <b>1,8</b>                | 2082839,645              |
| <b>1,7</b>                | 1023027,391              |
| <b>1,6</b>                | 329850,0146              |
| <b>1,5</b>                | -338530,5245             |
| <b>1,4</b>                | -979765,2946             |
| <b>1,3</b>                | -1591095,953             |
| <b>1,2</b>                | -2169245,65              |
| <b>1,1</b>                | -2710269,069             |
| <b>1</b>                  | -3209341,054             |
| <b>0,9</b>                | -3660449,745             |
| <b>0,8</b>                | -4055935,1               |
| <b>0,7</b>                | -4385764,612             |
| <b>0,6</b>                | -4636334,612             |
| <b>0,5</b>                | -4788347,3               |
| <b>0,4</b>                | -4812696,701             |
| <b>0,3</b>                | -4661423,206             |
| <b>0,2</b>                | -4243584,423             |
| <b>0,1</b>                | -3333915,977             |
| <b>0</b>                  | 0                        |

En las Tablas N° 30 y 31 se presentan las rentabilidades obtenidas a diferentes capacidades para el caso del gas industrial a nivel nacional e internacional.

**Tabla N° 30.** Rentabilidad obtenida para el caso de gas industrial a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD (Tmol/h)</b> | <b>RENTABILIDAD (\$)</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| <b>1,8</b>                | -2132744,076             |
| <b>1,7</b>                | -2857044,253             |
| <b>1,6</b>                | -3321982,12              |
| <b>1,5</b>                | -3762123,151             |
| <b>1,4</b>                | -4175118,413             |
| <b>1,3</b>                | -4558209,563             |
| <b>1,2</b>                | -4908119,752             |
| <b>1,1</b>                | -5220903,662             |
| <b>1</b>                  | -5491736,138             |
| <b>0,9</b>                | -5714605,321             |
| <b>0,8</b>                | -5881851,168             |
| <b>0,7</b>                | -5983441,171             |
| <b>0,6</b>                | -6005771,663             |
| <b>0,5</b>                | -5929544,842             |
| <b>0,4</b>                | -5725654,735             |
| <b>0,3</b>                | -5346141,731             |
| <b>0,2</b>                | -4700063,44              |
| <b>0,1</b>                | -3562155,485             |
| <b>0</b>                  | 0                        |

**Tabla N° 31.** Rentabilidad obtenida para el caso de gas industrial a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD (Tmol/h)</b> | <b>RENTABILIDAD (\$)</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| <b>1,8</b>                | 10787736,29              |
| <b>1,7</b>                | 9035114,182              |
| <b>1,6</b>                | 7870637,583              |
| <b>1,5</b>                | 6730957,821              |
| <b>1,4</b>                | 5618423,827              |
| <b>1,3</b>                | 4535793,946              |
| <b>1,2</b>                | 3486345,025              |
| <b>1,1</b>                | 2474022,384              |
| <b>1</b>                  | 1503651,176              |
| <b>0,9</b>                | 581243,2616              |
| <b>0,8</b>                | -285541,3164             |
| <b>0,7</b>                | -1086670,051             |
| <b>0,6</b>                | -1808539,274             |
| <b>0,5</b>                | -2431851,185             |
| <b>0,4</b>                | -2927499,809             |
| <b>0,3</b>                | -3247525,537             |
| <b>0,2</b>                | -3300985,977             |
| <b>0,1</b>                | -2862616,754             |
| <b>0</b>                  | 0                        |

Las rentabilidades obtenidas a diferentes capacidades para el caso del gas doméstico a nivel nacional e internacional se presentan en las Tablas N° 32 y 33.

**Tabla N° 32.** Rentabilidad obtenida para el caso de gas doméstico a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD (Tmol/h)</b> | <b>RENTABILIDAD (\$)</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| <b>1,8</b>                | -1319377,901             |
| <b>1,7</b>                | -2108412,689             |
| <b>1,6</b>                | -2617387,708             |
| <b>1,5</b>                | -3101565,889             |
| <b>1,4</b>                | -3558598,302             |
| <b>1,3</b>                | -3985726,603             |
| <b>1,2</b>                | -4379673,942             |
| <b>1,1</b>                | -4736495,003             |
| <b>1</b>                  | -5051364,631             |
| <b>0,9</b>                | -5318270,964             |
| <b>0,8</b>                | -5529553,962             |
| <b>0,7</b>                | -5675181,115             |
| <b>0,6</b>                | -5741548,758             |
| <b>0,5</b>                | -5709359,088             |
| <b>0,4</b>                | -5549506,132             |
| <b>0,3</b>                | -5214030,279             |
| <b>0,2</b>                | -4611989,138             |
| <b>0,1</b>                | -3518118,335             |
| <b>0</b>                  | 0                        |

**Tabla N° 33.** Rentabilidad obtenida para el caso de gas doméstico a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD (Tmol/h)</b> | <b>RENTABILIDAD (\$)</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| <b>1,8</b>                | 6232895,027              |
| <b>1,7</b>                | 4842786                  |
| <b>1,6</b>                | 3924916,94               |
| <b>1,5</b>                | 3031844,719              |
| <b>1,4</b>                | 2165918,266              |
| <b>1,3</b>                | 1329895,924              |
| <b>1,2</b>                | 527054,544               |
| <b>1,1</b>                | -238660,5574             |
| <b>1</b>                  | -962424,2254             |
| <b>0,9</b>                | -1638224,6               |
| <b>0,8</b>                | -2258401,637             |
| <b>0,7</b>                | -2812922,831             |
| <b>0,6</b>                | -3288184,515             |
| <b>0,5</b>                | -3664888,885             |
| <b>0,4</b>                | -3913929,97              |
| <b>0,3</b>                | -3987348,157             |
| <b>0,2</b>                | -3794201,057             |
| <b>0,1</b>                | -3109224,294             |
| <b>0</b>                  | 0                        |

En las Tablas N° 34 y 35 se presentan las rentabilidades obtenidas a diferentes capacidades para el caso del gas para producción de energía a nivel nacional e internacional.

**Tabla N° 34.** Rentabilidad obtenida para el caso del gas para producción de energía a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD (Tmol/h)</b> | <b>RENTABILIDAD (\$)</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| <b>1,8</b>                | -2861763,109             |
| <b>1,7</b>                | -3528041,738             |
| <b>1,6</b>                | -3953509,166             |
| <b>1,5</b>                | -4354179,756             |
| <b>1,4</b>                | -4727704,577             |
| <b>1,3</b>                | -5071325,288             |
| <b>1,2</b>                | -5381765,036             |
| <b>1,1</b>                | -5655078,505             |
| <b>1</b>                  | -5886440,542             |
| <b>0,9</b>                | -6069839,284             |
| <b>0,8</b>                | -6197614,691             |
| <b>0,7</b>                | -6259734,253             |
| <b>0,6</b>                | -6242594,305             |
| <b>0,5</b>                | -6126897,044             |
| <b>0,4</b>                | -5883536,496             |
| <b>0,3</b>                | -5464553,052             |
| <b>0,2</b>                | -4779004,32              |
| <b>0,1</b>                | -3601625,926             |
| <b>0</b>                  | 0                        |

**Tabla N° 35.** Rentabilidad obtenida para el caso del gas para producción de energía a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD (Tmol/h)</b> | <b>RENTABILIDAD (\$)</b> |
|---------------------------|--------------------------|
| <b>1,8</b>                | 4931511,108              |
| <b>1,7</b>                | 3644977,303              |
| <b>1,6</b>                | 2797567,579              |
| <b>1,5</b>                | 1974954,692              |
| <b>1,4</b>                | 1179487,574              |
| <b>1,3</b>                | 413924,5676              |
| <b>1,2</b>                | -318457,4772             |
| <b>1,1</b>                | -1013713,243             |
| <b>1</b>                  | -1667017,576             |
| <b>0,9</b>                | -2272358,615             |
| <b>0,8</b>                | -2822076,318             |
| <b>0,7</b>                | -3306138,177             |
| <b>0,6</b>                | -3710940,526             |
| <b>0,5</b>                | -4017185,561             |
| <b>0,4</b>                | -4195767,31              |
| <b>0,3</b>                | -4198726,163             |
| <b>0,2</b>                | -3935119,727             |
| <b>0,1</b>                | -3179683,629             |
| <b>0</b>                  | 0                        |

ANEXO 2. TABLAS UTILIZADAS PARA GRAFICAR EL PUNTO DE  
EQUILIBRIO DE LAS CURVAS DE RENTABILIDAD EN FUNCIÓN DE LA  
CAPACIDAD DE PLANTA PARA CADA ETAPA QUE CONFORMA LA RED  
DE VALORIZACIÓN DEL GAS NATURAL A NIVEL NACIONAL E  
INTERNACIONAL

**Tabla N° 36.** Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas vehicular a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(Tmol/h)</b> | <b>COSTO A<br/>(\$)</b> | <b>GANANCIA = INGRESOS<br/>(\$)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1,8                           | 28797679                | 25909519,26                         |
| 1,7                           | 27399756,42             | 23847418,92                         |
| 1,6                           | 26421005,34             | 22444629,57                         |
| 1,5                           | 25417457,42             | 21041840,22                         |
| 1,4                           | 24386763,73             | 19639050,88                         |
| 1,3                           | 23326165,93             | 18236261,53                         |
| 1,2                           | 22232387,16             | 16833472,18                         |
| 1,1                           | 21101482,12             | 15430682,83                         |
| 1                             | 19928625,65             | 14027893,48                         |
| 0,9                           | 18707805,88             | 12625104,13                         |
| 0,8                           | 17431362,78             | 11222314,79                         |
| 0,7                           | 16089263,83             | 9819525,438                         |
| 0,6                           | 14667905,37             | 8416736,09                          |
| 0,5                           | 13147989,6              | 7013946,741                         |
| 0,4                           | 11500410,54             | 5611157,393                         |
| 0,3                           | 9677208,584             | 4208368,045                         |
| 0,2                           | 7587441,342             | 2805578,697                         |
| 0,1                           | 5005844,436             | 1402789,348                         |
| 0                             | 0                       | 0                                   |

**Tabla N° 37.** Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas industrial a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(Tmol/h)</b> | <b>COSTO A<br/>(\$)</b> | <b>GANANCIA = INGRESOS<br/>(\$)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| <b>1,8</b>                    | 28797679                | 26664934,92                         |
| <b>1,7</b>                    | 27399756,42             | 24542712,17                         |
| <b>1,6</b>                    | 26421005,34             | 23099023,22                         |
| <b>1,5</b>                    | 25417457,42             | 21655334,26                         |
| <b>1,4</b>                    | 24386763,73             | 20211645,31                         |
| <b>1,3</b>                    | 23326165,93             | 18767956,36                         |
| <b>1,2</b>                    | 22232387,16             | 17324267,41                         |
| <b>1,1</b>                    | 21101482,12             | 15880578,46                         |
| <b>1</b>                      | 19928625,65             | 14436889,51                         |
| <b>0,9</b>                    | 18707805,88             | 12993200,56                         |
| <b>0,8</b>                    | 17431362,78             | 11549511,61                         |
| <b>0,7</b>                    | 16089263,83             | 10105822,66                         |
| <b>0,6</b>                    | 14667905,37             | 8662133,706                         |
| <b>0,5</b>                    | 13147989,6              | 7218444,755                         |
| <b>0,4</b>                    | 11500410,54             | 5774755,804                         |
| <b>0,3</b>                    | 9677208,584             | 4331066,853                         |
| <b>0,2</b>                    | 7587441,342             | 2887377,902                         |
| <b>0,1</b>                    | 5005844,436             | 1443688,951                         |
| <b>0</b>                      | 0                       | 0                                   |

**Tabla N° 38.** Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas doméstico a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(Tmol/h)</b> | <b>COSTO A<br/>(\$)</b> | <b>GANANCIA = INGRESOS<br/>(\$)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| <b>1,8</b>                    | 28797679                | 27478301,1                          |
| <b>1,7</b>                    | 27399756,42             | 25291343,73                         |
| <b>1,6</b>                    | 26421005,34             | 23803617,63                         |
| <b>1,5</b>                    | 25417457,42             | 22315891,53                         |
| <b>1,4</b>                    | 24386763,73             | 20828165,42                         |
| <b>1,3</b>                    | 23326165,93             | 19340439,32                         |
| <b>1,2</b>                    | 22232387,16             | 17852713,22                         |
| <b>1,1</b>                    | 21101482,12             | 16364987,12                         |
| <b>1</b>                      | 19928625,65             | 14877261,02                         |
| <b>0,9</b>                    | 18707805,88             | 13389534,92                         |
| <b>0,8</b>                    | 17431362,78             | 11901808,81                         |
| <b>0,7</b>                    | 16089263,83             | 10414082,71                         |
| <b>0,6</b>                    | 14667905,37             | 8926356,61                          |
| <b>0,5</b>                    | 13147989,6              | 7438630,509                         |
| <b>0,4</b>                    | 11500410,54             | 5950904,407                         |
| <b>0,3</b>                    | 9677208,584             | 4463178,305                         |
| <b>0,2</b>                    | 7587441,342             | 2975452,203                         |
| <b>0,1</b>                    | 5005844,436             | 1487726,102                         |
| <b>0</b>                      | 0                       | 0                                   |

**Tabla N° 39.** Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel nacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(Tmol/h)</b> | <b>COSTO A<br/>(\$)</b> | <b>GANANCIA = INGRESOS<br/>(\$)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1,8                           | 28797679                | 25935915,89                         |
| 1,7                           | 27399756,42             | 23871714,68                         |
| 1,6                           | 26421005,34             | 22467496,17                         |
| 1,5                           | 25417457,42             | 21063277,66                         |
| 1,4                           | 24386763,73             | 19659059,15                         |
| 1,3                           | 23326165,93             | 18254840,64                         |
| 1,2                           | 22232387,16             | 16850622,13                         |
| 1,1                           | 21101482,12             | 15446403,62                         |
| 1                             | 19928625,65             | 14042185,11                         |
| 0,9                           | 18707805,88             | 12637966,6                          |
| 0,8                           | 17431362,78             | 11233748,08                         |
| 0,7                           | 16089263,83             | 9829529,574                         |
| 0,6                           | 14667905,37             | 8425311,064                         |
| 0,5                           | 13147989,6              | 7021092,553                         |
| 0,4                           | 11500410,54             | 5616874,042                         |
| 0,3                           | 9677208,584             | 4212655,532                         |
| 0,2                           | 7587441,342             | 2808437,021                         |
| 0,1                           | 5005844,436             | 1404218,511                         |
| 0                             | 0                       | 0                                   |

**Tabla N° 40.** Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas vehicular a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(Tmol/h)</b> | <b>COSTO A<br/>(\$)</b> | <b>GANANCIA = INGRESOS<br/>(\$)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1,8                           | 28797679                | 30880518,64                         |
| 1,7                           | 27399756,42             | 28422783,81                         |
| 1,6                           | 26421005,34             | 26750855,35                         |
| 1,5                           | 25417457,42             | 25078926,89                         |
| 1,4                           | 24386763,73             | 23406998,43                         |
| 1,3                           | 23326165,93             | 21735069,97                         |
| 1,2                           | 22232387,16             | 20063141,51                         |
| 1,1                           | 21101482,12             | 18391213,05                         |
| 1                             | 19928625,65             | 16719284,59                         |
| 0,9                           | 18707805,88             | 15047356,13                         |
| 0,8                           | 17431362,78             | 13375427,68                         |
| 0,7                           | 16089263,83             | 11703499,22                         |
| 0,6                           | 14667905,37             | 10031570,76                         |
| 0,5                           | 13147989,6              | 8359642,297                         |
| 0,4                           | 11500410,54             | 6687713,838                         |
| 0,3                           | 9677208,584             | 5015785,378                         |
| 0,2                           | 7587441,342             | 3343856,919                         |
| 0,1                           | 5005844,436             | 1671928,459                         |
| 0                             | 0                       | 0                                   |

**Tabla N° 41.** Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas industrial a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(Tmol/h)</b> | <b>COSTO A<br/>(\$)</b> | <b>GANANCIA = INGRESOS<br/>(\$)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1,8                           | 28797679                | 39585415,29                         |
| 1,7                           | 27399756,42             | 36434870,6                          |
| 1,6                           | 26421005,34             | 34291642,92                         |
| 1,5                           | 25417457,42             | 32148415,24                         |
| 1,4                           | 24386763,73             | 30005187,55                         |
| 1,3                           | 23326165,93             | 27861959,87                         |
| 1,2                           | 22232387,16             | 25718732,19                         |
| 1,1                           | 21101482,12             | 23575504,51                         |
| 1                             | 19928625,65             | 21432276,82                         |
| 0,9                           | 18707805,88             | 19289049,14                         |
| 0,8                           | 17431362,78             | 17145821,46                         |
| 0,7                           | 16089263,83             | 15002593,78                         |
| 0,6                           | 14667905,37             | 12859366,09                         |
| 0,5                           | 13147989,6              | 10716138,41                         |
| 0,4                           | 11500410,54             | 8572910,73                          |
| 0,3                           | 9677208,584             | 6429683,047                         |
| 0,2                           | 7587441,342             | 4286455,365                         |
| 0,1                           | 5005844,436             | 2143227,682                         |
| 0                             | 0                       | 0                                   |

**Tabla N° 42.** Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad para gas doméstico a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(Tmol/h)</b> | <b>COSTO A<br/>(\$)</b> | <b>GANANCIA = INGRESOS<br/>(\$)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| <b>1,8</b>                    | 28797679                | 35030574,03                         |
| <b>1,7</b>                    | 27399756,42             | 32242542,42                         |
| <b>1,6</b>                    | 26421005,34             | 30345922,28                         |
| <b>1,5</b>                    | 25417457,42             | 28449302,13                         |
| <b>1,4</b>                    | 24386763,73             | 26552681,99                         |
| <b>1,3</b>                    | 23326165,93             | 24656061,85                         |
| <b>1,2</b>                    | 22232387,16             | 22759441,71                         |
| <b>1,1</b>                    | 21101482,12             | 20862821,56                         |
| <b>1</b>                      | 19928625,65             | 18966201,42                         |
| <b>0,9</b>                    | 18707805,88             | 17069581,28                         |
| <b>0,8</b>                    | 17431362,78             | 15172961,14                         |
| <b>0,7</b>                    | 16089263,83             | 13276341                            |
| <b>0,6</b>                    | 14667905,37             | 11379720,85                         |
| <b>0,5</b>                    | 13147989,6              | 9483100,711                         |
| <b>0,4</b>                    | 11500410,54             | 7586480,569                         |
| <b>0,3</b>                    | 9677208,584             | 5689860,427                         |
| <b>0,2</b>                    | 7587441,342             | 3793240,285                         |
| <b>0,1</b>                    | 5005844,436             | 1896620,142                         |
| <b>0</b>                      | 0                       | 0                                   |

**Tabla N° 43.** Datos para graficar el punto de equilibrio de la curva de rentabilidad en función de la capacidad del gas para producción de energía a nivel internacional

| <b>CAPACIDAD<br/>(Tmol/h)</b> | <b>COSTO A<br/>(\$)</b> | <b>GANANCIA = INGRESOS<br/>(\$)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1,8                           | 28797679                | 33729190,11                         |
| 1,7                           | 27399756,42             | 31044733,72                         |
| 1,6                           | 26421005,34             | 29218572,91                         |
| 1,5                           | 25417457,42             | 27392412,11                         |
| 1,4                           | 24386763,73             | 25566251,3                          |
| 1,3                           | 23326165,93             | 23740090,49                         |
| 1,2                           | 22232387,16             | 21913929,69                         |
| 1,1                           | 21101482,12             | 20087768,88                         |
| 1                             | 19928625,65             | 18261608,07                         |
| 0,9                           | 18707805,88             | 16435447,26                         |
| 0,8                           | 17431362,78             | 14609286,46                         |
| 0,7                           | 16089263,83             | 12783125,65                         |
| 0,6                           | 14667905,37             | 10956964,84                         |
| 0,5                           | 13147989,6              | 9130804,036                         |
| 0,4                           | 11500410,54             | 7304643,229                         |
| 0,3                           | 9677208,584             | 5478482,421                         |
| 0,2                           | 7587441,342             | 3652321,614                         |
| 0,1                           | 5005844,436             | 1826160,807                         |
| 0                             | 0                       | 0                                   |